

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный университет
им. А. М. Горького

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 39-й Международной
студенческой научной конференции

Екатеринбург

1—5 февраля 2010 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2010

УДК 524.4
Ф 503

Печатается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов,
А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский государ-
ственный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский
государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии
РАН)

Физика Космоса: Тр. 39-й Международ. студ. науч.
Ф 503 конф., Екатеринбург, 1—5 февр. 2010 г. — Екатеринбург:
Изд-во Урал. ун-та, 2010. — 271 с.

ISBN 978-5-7996-0497-4

УДК 524.4

ISBN 978-5-7996-0497-4

© ГОУ ВПО «Уральский государственный
университет им. А. М. Горького», 2010

ФИЗИКА КОСМОСА
39-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

1—5 февраля 2010 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский государственный университет), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет), М. Е. Прохоров (ГАИШ МГУ), А. М. Соболев (Уральский государственный университет), К. И. Чурюмов (Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), А. И. Васюнин (Институт астрономии общества Макса Планка, Германия), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), С. Н. Замоздра (Челябинский государственный университет), В. В. Орлов (Научно-исследовательский астрономический институт СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет).

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбурга

Уральский государственный университет им. А. М. Горького

Программа конференции

Место проведения — Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета.

Открытие конференции		Ауд. № 15
1 февраля, понедельник	15.00	

Пленарные заседания		Ауд. № 15
1 февраля, понедельник	15.30—18.45	
2 февраля, вторник	10.00—12.45, 14.30—18.45	
3 февраля, среда	10.00—12.45, 14.30—19.15	
4 февраля, четверг	14.30—18.45	

Семинар «Физика звездно-газовых комплексов»	Ауд. № 9
2 февраля, вторник	10.00—12.15

Семинар «Небесная механика»	Ауд. № 9
3 февраля, среда	10.00—12.45

Стендовые доклады	Холл
4 февраля, четверг	11.00—13.00

Заккрытие конференции	Ауд. № 15
4 февраля, четверг	20.30

1 февраля, понедельник, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

15.00—15.30 ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ (выступления президента Уральского университета В. Е. Третьякова, председателя научного организационного комитета конференции К. В. Холшевникова, директора Астрономической обсерватории П. Е. Захаровой)

Председатель Константин Владиславович Холшевников,
д-р физ.-мат. наук

15.30—16.15 Борис Михайлович Шустов (чл.-корр. РАН,
Институт астрономии РАН)
Астероидно-кометная опасность: работа для астрономов!

16.15—17.00 Владимир Леонидович Кауц (канд. физ.-мат.
наук, АКЦ ФИАН)
Темная материя во Вселенной и Солнечной системе.

17.00—17.15 П Е Р Е Р Ы В

17.15—17.30 Сергей Александрович Хоперсков (магистратура
I курс, ВолГУ)
Расчет глобальных собственных мод в газовом галактическом
диске в линейном и нелинейном приближениях.

17.30—17.45 Сергей Александрович Хайбрахманов (маги-
стратура II курс, ЧелГУ)
Магнитогазодинамическая модель аккреционных дисков моло-
дых звезд.

17.45—18.00 Александр Сергеевич Склянов (V курс, КГУ)
Фотометрические исследования карликовой новой MN Dra в
июле—сентябре 2009 года.

18.00—18.45 Николай Григорьевич Макаренко (д-р физ.-
мат. наук, ГАО РАН)
Геометрия и топология астрономических изображений.

2 февраля, вторник, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

Председатель Николай Григорьевич Макаренко, д-р физ.-мат. наук

10.00—10.45 Константин Владиславович Холшевников (д-р физ.-мат. наук, АИ СПбГУ), Александр Альбертович Мюлляри (канд. физ.-мат. наук, Университет г. Турку, Финляндия)

Определение орбит внесолнечных планет методом лучевых скоростей.

10.45—11.30 Виктор Владимирович Орлов (д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный университет), Алексей Вадимович Рубинов (канд. физ.-мат. наук, НИАИ СПбГУ), Алия Ибрагимовна Мартынова (преподаватель, СПбГЛТА)

Периодические орбиты в задаче N тел.

11.30—11.45 П Е Р Е Р Ы В

11.45—12.00 Александр Сергеевич Перминов (III курс, УрГУ)
Резонансная структура области движения искусственных спутников Земли.

12.00—12.15 Виктория Олеговна Шагдурова (IV курс, ТГУ)
Кинематическое моделирование орбит внутренних спутников.

12.15—12.30 Дарья Александровна Толумбаева (IV курс, СПбГУ)
Исследование зацепленности орбит астероидов.

12.30—12.45 Андрей Петрович Игошев (III курс, СПбГУ)
Эволюция магнитных потоков звезд.

13.00—14.30 О Б Е Д

2 февраля, вторник, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

Председатель Виктор Владимирович Орлов, д-р физ.-мат. наук

14.30—15.15 Константин Михайлович Фирсов (д-р физ.-мат. наук, Волгоградский государственный университет)
Современные методы расчета переноса радиации в задачах моделирования климата Земли.

15.15—16.00 Юрий Васильевич Хачай (д-р физ.-мат. наук, Институт геофизики УрО РАН), Всеволод Николаевич Анфилов (член-кор. РАН, Институт минералогии УрО РАН)
Модели распределения температуры во внутренних оболочках Земли на стадии ее аккумуляции.

16.00—16.15 Александр Александрович Марчук (II курс, СПбГУ)
Кривые вращения галактик и адиабатическое поджатие темного гало.

16.15—16.30 Константин Сергеевич Павловский (V курс, СПбГУ)
Моделирование полей скоростей пекулярных галактик.

16.30—16.45 Елена Вячеславовна Борисова (IV курс, СПбГУ)
Хроматическая переменность блазаров.

16.45—17.00 Кристина Сергеевна Доманская (I курс, ВолГУ)
Динамика столкновений облаков HI в МЗС.

17.00—17.15 П Е Р Е Р Ы В

17.15—17.30 Виктор Николаевич Любимов (магистратура I курс, ВолГУ)
Трехмерное моделирование столкновений облаков HI в межзвездной среде.

17.30—17.45 Екатерина Алексеевна Сухарева (IV курс, ЧелГУ)
Исследование фрагментации коллапсирующих турбулентных протозвездных облаков.

17.45—18.00 Михаил Александрович Безбородов (IV курс, ВолГУ)

Распределение межзвездной пыли за фронтом галактической ударной волны: численная модель.

18.00—18.45 Александр Анатольевич Соловьев (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)

Магнитогидростатические конфигурации в космической плазме: структура магнитной звезды, шаровая магнитная бомба и др.

2 февраля, вторник, ауд. 9, 10⁰⁰—12¹⁵

Семинар «ФИЗИКА ЗВЕЗДНО-ГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ»

Председатель Ольга Касьяновна Сильченко, д-р физ.-мат. наук

10.00—10.15 Галина Николаевна Дремова (канд. физ.-мат. наук, РФЯЦ)

Роль межгалактического газа в динамической эволюции галактического скопления, погруженного в поле темного вещества.

10.15—10.30 Мария Анатольевна Бутенко (аспирант, ВолГУ)

Особенности распределения темного вещества в гало и спиральная структура дисковых галактик.

10.30—10.45 Вера Васильевна Коваль (аспирант, ЮФУ)

Влияние радиальной миграции звезд на параметры эллипсоидов скоростей в галактическом диске.

10.45—11.00 П Е Р Е Р Ы В

11.00—11.15 Андрей Михайлович Соболев (канд. физ.-мат. наук, АО УрГУ)

Область звездообразования S 235 C.

11.15—11.30 Марина Владимировна Рябова (научный работник, ЮФУ)

Проблема происхождения антикорреляции [O/Na] в шаровых скоплениях.

11.30—11.45 Владислав Владимирович Шиманский (канд. физ.-мат. наук, КГУ)

Анализ излучения двойных систем с релятивистскими компонентами.

11.45—12.00 Валентин Федорович Есипов (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Спектроскопия с акусто-оптическими фильтрами.

12.00—12.15 Дмитрий Алексеевич Кононов (научный работник, ИНАСАН)

Доплеровское картирование SS Cygni во время вспышки.

3 февраля, среда, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

Председатель Михаил Евгеньевич Прохоров, д-р физ.мат. наук

10.00—10.45 Ольга Касьяновна Сильченко (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Медленная динамическая эволюция галактик.

10.45—11.30 Игорь Иванович Зинченко (д-р физ.-мат. наук, Институт прикладной физики РАН)

Актуальные задачи и новые инструменты миллиметровой и субмиллиметровой астрономии.

11.30—11.45 П Е Р Е Р Ы В

11.45—12.00 Александр Сергеевич Клепнев (IV курс, ИКИ)

Аккреционные диски вокруг черных дыр.

12.00—12.15 Василий Александрович Устюгов (магистратура II курс, ЧелГУ)

Генерация магнитного поля в аккреционном диске системы Cyg X1.

12.15—12.30 Максим Маратович Габдеев (IV курс, КГУ)

Кривая блеска оптического транзиента GRB060526.

12.30—12.45 Таисия Геннадьевна Копытова (IV курс, УрГУ)

Измерение поляризации GRB091020 и GRB091127 по наблюдениям телескопа «МАСТЕР-II», Кисловодск.

13.00—14.30 О Б Е Д

3 февраля, среда, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

Председатель Игорь Иванович Зинченко, д-р физ.мат. наук

14.30—15.15 Александр Владимирович Лапинов (канд. физ.-мат. наук, Институт прикладной физики РАН)
Использование прецизионной спектроскопии для исследований областей звездообразования и фундаментальных свойств Вселенной.

15.15—16.00 Антон Иванович Васюнин (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии Общества Макса Планка, Германия)
Химия протопланетных дисков.

16.00—16.15 Александр Иванович Колбин (IV курс, КГУ)
Определение фундаментальных параметров звезд спектральных классов A, F методом инфракрасных потоков.

16.15—16.30 Сергей Юрьевич Парфёнов (IV курс, УрГУ)
Об определении электронной температуры в зонах НII по линиям ионов кислорода.

16.30—16.45 Егор Ралифович Сафутдинов (IV курс, МГУ)
Зондирование межзвездной плазмы сигналами радиопульсаров.

16.45—17.00 П Е Р Е Р Ы В

17.00—17.15 Даниил Игоревич Теханович (III курс, СПбГУ)
Неоднородности в распределении галактик согласно обзору SDSS DR7.

17.15—17.30 Ярослав Владимирович Найден (I курс, СПбГУ)
Симметрия анизотропии космического микроволнового фона.

17.30—17.45 Дмитрий Игоревич Соловьёв (V курс, СПбГУ)
Статистика внегалактических объектов в области Холодного Пятна на картах CMB.

17.45—18.30 Сергей Николаевич Замоздра (преподаватель, Челябинский государственный университет)
О практической пользе теории звездообразования.

18.30—19.15 Клим Иванович Чурюмов (д-р физ.-мат. наук,
Киевский национальный университет, Украина)
Новое о природе комет после космических миссий Айс,
Вега, Джотто, Дип Спейс, Стардаст, Дип Импект и пе-
ред миссией Розетта.

3 февраля, среда, ауд. 10, 10⁰⁰—12⁴⁵

Семинар «НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА»

Председатель Эдуард Дмитриевич Кузнецов, канд. физ.-мат. наук

10.00—10.45 Марина Геннадьевна Ишмухаметова (канд. физ.-мат. наук, Казанский государственный университет)

Комплекс метеорных тел как инструмент для изучения эволюции и динамики малых тел Солнечной системы.

10.45—11.00 Борис Борисович Эскин (преподаватель, СПбГУ)

Влияние эффекта Лидова—Кодзай на особенности резонансного движения в экзопланетных системах.

11.00—11.15 Николай Борисович Железнов (канд. физ.-мат. наук, ИПА РАН)

AMPLE3 — многоцелевой программный пакет для исследования малых тел Солнечной системы.

11.15—11.30 Марина Геннадьевна Ишмухаметова (канд. физ.-мат. наук, КГУ)

Теоретические радианты новых периодических комет.

11.30—11.45 П Е Р Е Р Ы В

11.45—12.00 Вахит Шамильевич Шайдулин (научный работник, СПбГУ)

Оценка скорости убывания общего члена ряда Лапласа для геопотенциала.

12.00—12.15 Оксана Никитична Раздымакина (аспирант, ТГУ)

Области возможных движений АСЗ в окрестности резонанса 1/2 с Землей.

12.15—12.30 Алия Ибрагимовна Мартынова (преподаватель, СПбГЛТА)

Исследование состояний и движений в общей задаче трех тел.

12.30—12.45 Леонид Николаевич Судов (аспирант, СПбГУ)

Об одном методе регуляризации уравнений небесной механики.

4 февраля, четверг, ауд. 15

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

Председатель Борис Михайлович Шустов, член-кор.
РАН

14.30—15.15 Владимир Михайлович Липунов (д-р физ.-мат.
наук, ГАИШ МГУ)

Роботизированная сеть телескопов МАСТЕР.

15.15—16.00 Алексей Васильевич Миронов (канд. физ.-мат.
наук, ГАИШ МГУ), Андрей Игоревич Захаров (науч-
ный работник, ГАИШ МГУ), Михаил Евгеньевич Про-
хоров (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Многоцветные фотометрические системы: прошлое и
настоящее.

16.00—16.45 Михаил Евгеньевич Прохоров (д-р физ.-мат.
наук, ГАИШ МГУ), Андрей Игоревич Захаров (науч-
ный работник, ГАИШ МГУ), Алексей Васильевич Ми-
ронов (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Фотометрические программы для Новых Коуровских
Телескопов — взгляд со стороны.

16.45—17.00 П Е Р Е Р Ы В

17.00—17.15 Резюме секции стендовых докладов

17.15—18.00 Людмила Ивановна Машонкина (д-р физ.-мат.
наук, Институт астрономии РАН)

Звезды с дефицитом металлов о нуклеосинтезе в Га-
лактике.

18.00—18.45 Дмитрий Зигфридович Вибе (д-р физ.-мат. на-
ук, Институт астрономии РАН)

Массивные звезды.

20.00 ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

04 февраля, четверг, холл, 11⁰⁰—13⁰⁰

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

Председатель Дмитрий Зигфридович Вибе, д-р физ.-мат. наук

1. **Ахматханова Г. Г., Соболев А. М.** (АО УрГУ), **Юшкин М. В.** (САО РАН), **Boley P.** (MPIA, Germany), **Bieging J.** (Steward Observatory, USA)
Туманность S233 и создающая ее звезда.
2. **Бутенко М. А., Хоперсков А. В.** (ВолГУ)
О влиянии вертикальной неоднородности галактического диска на гравитационную устойчивость.
3. **Горда С. Ю., Соболев А. М.** (АО УрГУ)
Новая переменная?
4. **Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кайзер Г. Т., Кузнецов Э. Д.** (АО УрГУ)
Результаты наблюдений высокоорбитальных спутников Земли на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2009 году.
5. **Кайзер Г. Т., Вибе Ю. З., Гламазда Д. В.** (АО УрГУ), **Скрипниченко П. В.** (УрГУ)
Позиционные наблюдения малых планет в Коуровской астрономической обсерватории Уральского государственного университета.
6. **Кожевников В. П.** (АО УрГУ)
Наблюдения промежуточного поляра XSS J00564+4548.
7. **Кожевникова А. В., Кожевников В. П.** (АО УрГУ), **Дорогов А. А., Юшков И. А.** (УрГУ)
Пятенная активность системы CG Cyg: три новых сезона наблюдений.
8. **Лямова Г. В.** (АО УрГУ)
Скорость вращения солнечных пятен.
9. **Никифорова Т. П., Шагабутдинов А. И., Калинин А. А.** (АО УрГУ), **Копытова Т. Г., Парфёнов С. Ю., Искалина М. С.** (УрГУ)
Наблюдения протуберанцев в АО УрГУ летом 2009 г.

10. **Островский А. Б.** (УрГУ), **Соболев А. М.** (АО УрГУ)
О диагностике пылевой компоненты окружения метанольных мазеров.
11. **Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З., Фатеева А. М.** (ИНА-САН)
Тепловая структура массивных дозвездных ядер.
12. **Полушина Т. С.** (АО УрГУ), **Кумсиашвили М. И.** (Аба-стуманская обсерватория, Грузия)
Фотометрическое исследование переменности массивной двойной системы с горячими компонентами UU SA.
13. **Пунанов Г. Ф.** (УрГУ), **Лихачев В. Н.** (ЗАО «Дубль-Гео»), **Бахтияров М. А., Казин В. В.** (УрГУ)
Создание планово-высотного обоснования для топографической съемки масштабов 1:500—1:5 000.
14. **Рохас М. М.** (СПбГУ)
Бариевые звезды.
15. **Салий С. В.** (АО УрГУ)
Расширенная база значений населенностей уровней метанола.
16. **Салий С. В., Соболев А. М.** (АО УрГУ)
Оценка физических параметров S255 N, IR и S по линиям метанола.
17. **Селезнев А. Ф.** (АО УрГУ), **Carraro G.** (ESO, Chile), **Sarajedini A., Kinemuchi K.** (UF, USA)
Исследование структуры рассеянного скопления M35.

Обзорные лекции

А. И. Васюнин

Институт астрономии общества Макса Планка, Германия

ХИМИЯ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

В лекции рассматривается химическая эволюция протопланетных дисков около звезд малых масс. Показывается роль важнейших физических процессов, контролирующих химическое состояние дисков: поля излучения центральной звезды, динамической эволюции вещества диска вследствие турбулентного перемешивания и глобальных потоков [1], а также роста пылевых частиц в процессе планетообразования [2]. Обсуждается возможность образования сложных органических молекул в диске [3], а также влияние химического состава вещества диска на протекающие в нем физические процессы. Отмечается важная роль наблюдений радиолиний молекул для понимания кинематики и физического состояния протопланетных дисков.

In the lecture, chemical evolution of protoplanetary disks around low-mass stars is reviewed. Major processes that control chemistry in disks are discussed including radiation field of the central star, process of grain growth and dynamical evolution of disks due to turbulent mixing and global flows. Formation of complex organic molecules in disks as well as feedback of chemistry on physical processes is also discussed.

Список литературы

1. *Balbus S. A., Hawley J. F.* Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks // *Reviews of Modern Physics*. — 1998. — Vol. 70. — P. 1–53.
2. *Safronov V. S.* Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets., Ed. by Safronov, V. S. — 1972.
3. *Herbst E., van Dishoeck E. F.* Complex Organic Interstellar Molecules // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 47. — P. 427–480.

МАССИВНЫЕ ЗВЕЗДЫ

В лекции рассматриваются различные аспекты эволюции массивных звезд, то есть звезд, масса которых превосходит $10 M_{\odot}$, и их вклад в общую эволюцию Галактики.

Various aspects of evolution of massive stars (with mass exceeding 10 solar masses) are considered, including their contribution into the global evolution of the Galaxy.

Звездная олигархия

Олигархия (греч. *ὀλιγαρχία* — власть немногих), форма правления, при которой государственная власть принадлежит небольшой группе людей, как правило, наиболее экономически могущественных.

Большая советская энциклопедия

Диапазон звездных масс необычайно широк и простирается от 0.1 до $150 M_{\odot}$ (о возможности существования более массивных звезд и по сей день идут споры). Это означает, что наилегчайшее светило по массе уступает наитяжелейшему более чем на три порядка величины. Правда, это справедливо лишь в отношении отдельных объектов; если говорить обо всей совокупности звезд Галактики, то в ней маломассивные звезды явно доминируют, как по числу, так и по массе. До сих пор наиболее простым представлением для начальной функции масс (НФМ) — распределения рождающихся звезд по массам — считается так называемая функция Солпитера [1] (хотя предложены и более детальные представления):

$$dN(M) \propto M^{-\alpha} dM,$$

где $dN(M)$ — количество звезд с массами в интервале от M до $M + dM$. При верхнем и нижнем пределах массы, равных 0.1 и $100 M_{\odot}$, соответственно, такое распределение означает, что звезд с массами выше $10 M_{\odot}$ рождается примерно в 500 раз меньше, чем звезд с меньшими массами. Со временем «разрыв в счете» между массивными и маломассивными звездами только увеличивается: маломассивные

светила живут существенно дольше, поэтому в *современную* функцию масс вносят вклад и звезды, сформировавшиеся миллиарды лет назад.

На рис. 1 показана диаграмма «цвет—величина» для ближайших звезд (расстояние менее 100 пк), построенная по данным проекта «Hipparcos». Серыми квадратами показаны яркие звезды спектральных классов В и О, черными точками — остальные звезды. На диаграмме хорошо видно, что в современных окрестностях Солнца ярких звезд действительно очень немного, и это с учетом того, что нижняя часть диаграммы существенно «недонаселена» из-за наблюдательной селекции. Ближайшая к нам звезда спектрального класса О — ζ Змееносца (спектральный класс О9.5V [2]) отстоит от нас на 140 пк [3], тогда как расстояние до ближайшей звезды самого раннего спектрального класса (О2—О3) составляет около 1 300 пк (звезда HD 150136; [4]).

Хотя диаграмма Герцшпрунга—Рассела (ГР) основана на сопоставлении спектрального класса (температуры, цвета) с *абсолютной звездной величиной* (или светимостью), на самом деле положение звезды на этой диаграмме определяется ее *массой* (а также возрастом и начальным химическим составом — согласно теореме Рассела—Фогта). Чем больше масса, тем сильнее разогреваются недра звезды, тем ярче она светит.

Неудивительно, что на диаграмме Герцшпрунга—Рассела массивные звезды занимают самое высокое положение (рис. 2). Находясь в главной последовательности, они попадают в спектральные классы от В2 до О2 (класс О2 был введен относительно недавно — в 2002 г. [5]) и имеют эффективные температуры от 20 000 до 60 000 К. Интересно, что даже массивные звезды главной последовательности (ГП) в литературе часто называют карликами, хотя, конечно, странно называть карликом звезду, радиус которой превышает солнечный во многие разы, а масса — во многие десятки раз. С «красной стороны» диаграммы ГР массивные звезды представлены красными сверхгигантами, и это название вполне уместно, поскольку красные сверхгиганты действительно очень велики. Совсем рядом с главной последовательностью располагается область голубых сверхгигантов. Между голубыми и красными сверхгигантами находится малонаселенная область желтых сверхгигантов. Самые яркие сверхгиганты с широкими эмиссионными линиями называют гипергигантами [6]. Выше сверхгигантов располагаются не только гипергиганты, но и яркие голубые переменные (luminous blue variable,

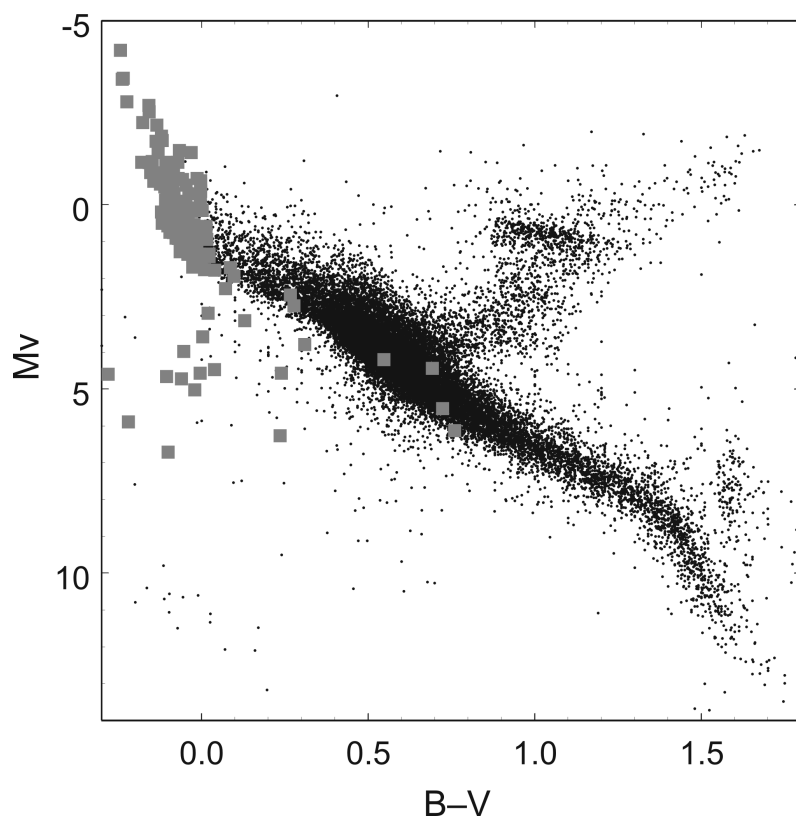


Рис. 1. Диаграмма «цвет—величина» для ближайших звезд (расстояние менее 100 пк) по данным проекта «Hipparcos». Серыми квадратами обозначены звезды спектральных классов В и О, черными точками — остальные звезды. Использована таблица, подготовленная Eric Mamajek (<http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/coolplots.html>)

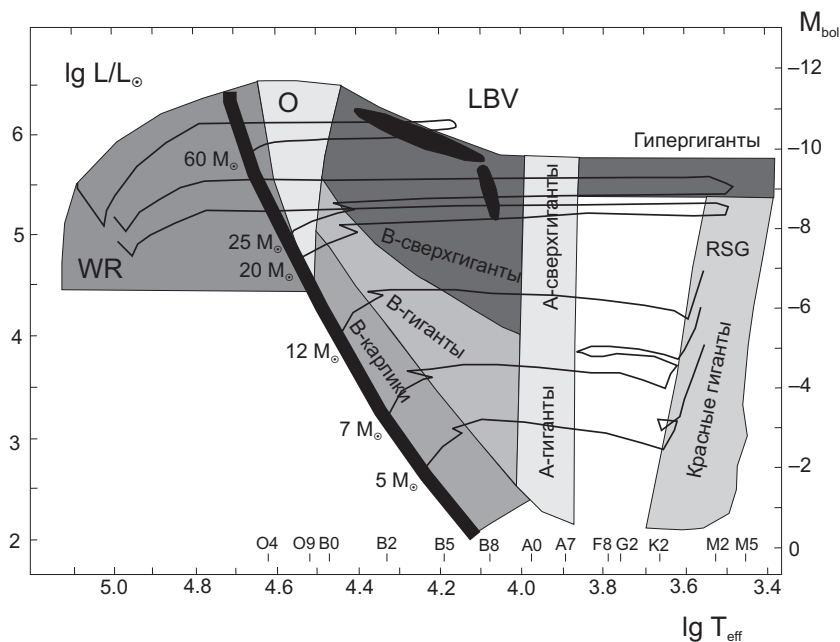


Рис. 2. Диаграмма Герцшпрунга—Рассела для наиболее массивных звезд [7]. WR — звезды Вольфа—Райе, RGS — красные сверхгиганты. Толстой черной линией показано примерное положение главной последовательности. Отмечены эволюционные треки для звезд различных масс

LBV) — звезды максимальной светимости, достигающей миллионов солнечных. Левее сверхгигантов находятся звезды Вольфа—Райе — очень горячие и яркие звезды, для спектров которых характерны слабые или вовсе отсутствующие линии водорода.

Чтобы посмотреть на массивные звезды «вживую», нужно, естественно, смотреть в направлении областей активного звездообразования. Примером «голубых карликов» могут служить звезды скопления Трапеции, а неподалеку от них располагается голубой сверхгигант Альнитак (ζ Ori) — крайняя левая звезда в поясе Ориона. В Орионе располагается и самый известный красный сверхгигант — Бетельгейзе. Радиус этой звезды, определенный при помощи интерферометрии, равен $645 \pm 129 R_{\odot}$ [8]. Эта величина значительная, но отнюдь не рекордная. Максимальным радиусом по современным оценкам обладает, по-видимому, звезда VV Cep [9] — $1\,800 R_{\odot}$!

Еще большее значение ($\sim 3000 R_{\odot}$) приводят иногда для звезды VY CMa [10], однако в этом случае имеется значительная неопределенность, связанная с наличием у этой звезды пылевой оболочки.

Самая известная LBV-звезда — это η Car, но и другие звезды этого класса не менее известны, как например звезда P Cyg, давшая название целому виду спектральных линий. Правда, две этих звезды могут быть не типичными, а скорее экстремальными представителями класса LBV, для которых характерны очень резкие изменения видимой яркости. Звезда η Car, например, знаменита своим «Великим извержением»: в 1837 г. ее яркость выросла на три величины, затем оставалась на уровне $-1-0^m$ в течение почти 20 лет, а потом еще за десятилетие упала до 8^m . Более типичные, спокойные и многочисленные LBV-звезды — это переменные типа S Dor с колебаниями видимого блеска $1-2^m$ на временах порядка лет и десятилетий. Предполагается, что переменность блеска LBV-звезд связана с интенсивной потерей вещества, но механизм этой потери, а также эволюционный статус LBV-звезд пока до конца не ясны [11].

Массивные звезды в Галактике

Именно малочисленные тяжеловесы играют определяющую роль в энергетическом и химическом балансе Галактики. В них синтезируются тяжелые химические элементы. Мощное излучение массивных звезд нагревает межзвездный газ и ионизует его. В оболочках сверхновых (заключительный этап эволюции массивной звезды) разгоняются космические лучи. Звездный ветер массивных звезд и оболочки сверхновых предположительно являются частичными причинами турбулизации межзвездной среды. И если присутствие Солнца едва ли ощущается на расстоянии более 100 а. е. (за исключением того что Солнце просто *видно*), то «зона влияния» даже одной массивной звезды простирается на десятки парсек. Когда же несколько массивных звезд в звездном скоплении с небольшим интервалом вспыхивают как сверхновые, возникшая в результате сверхоболочка пробивает галактический диск и вырывается уже не в межзвездную, а в межгалактическую среду. Иными словами, внешний облик и физическое состояние Галактики формируют не сотни миллиардов маломассивных светил (но не будем забывать об их вкладе в гравитационный потенциал!), а те несколько тысяч массивных звезд, что в любой момент присутствуют в Галактическом диске.

Возможность «кумулятивного» влияния массивных звезд отчасти связана с тем, что по галактическому диску они распределены очень неравномерно. В качестве примера в табл. 1 приводятся параметры О-звезд, видимых невооруженным глазом. Все параметры, за исключением звездных величин V , взяты из каталога [12]. Звездные величины взяты из каталога [13]. Из таблицы видно, что подавляющее большинство из этих звезд либо входит в состав ассоциаций, либо было выброшено из них.

Это соотношение сохраняется и в больших выборках. Например, из 378 звезд каталога [2] к объектам поля отнесено 90 звезд. При этом нужно иметь в виду, что в каталог включались лишь звезды с точной спектральной классификацией. Это означает, что в нем относительно велика доля именно изолированных звезд. Более детальный анализ звезд поля, проведенный в работе [14], показал, что в целом к «истинному» населению поля может быть отнесено всего около 4 % О-звезд. Остальные звезды, которые в настоящий момент кажутся изолированными, либо на самом деле входят в состав бедных скоплений, либо были в прошлом выброшены из родительского скопления или ассоциации. Подобная же доля звезд поля характерна и для Большого Магелланова Облака (БМО) [15]. «Тягу» к скоплениям демонстрируют и другие массивные звезды — красные сверхгиганты и звезды Вольфа—Райе [16].

Какова природа звезд поля? В работе [17] высказано предположение, что изолированные О-звезды в реальности являются «верхушками айсберга» в звездных скоплениях, массы которых (в сочетании с НФМ) оказалось как раз достаточно для формирования *одной* массивной звезды. При этом, с учетом стохастичности процесса, как раз примерно в 5 % случаев должны образовываться скопления массой менее $100 M_{\odot}$, содержащие одну О-звезду и ни одной В-звезды. По мнению авторов [17], именно такие «сверхбедные» скопления мы и интерпретируем как одиночные О-звезды.

Этот вывод справедлив лишь при условии, что процесс звездообразования допускает формирование скоплений, в которых доминирует единственная звезда. Наблюдения более богатых скоплений указывают, что в реальности существует соотношение между массой скопления M_{cl} и массой его наиболее массивной звезды M_{max} . Это соотношение показано на рис. 3. Здесь тонкой сплошной линией показано соотношение $M_{cl}-M_{max}$, которое выполнялось бы для НФМ Солпитера без верхнего предела звездных масс, а толстой сплошной линией показано аналогичное соотношение для случая,

Таблица 1. Параметры О-звезд, видимых невооруженным глазом

HD	Имя	V	Sp	Расстояние, кпк	Примечание
37742	ζ Ori	1.8	O9.5Ib	0.5	Ori OB1
68273	γ Vel	1.8	WC8+O8.5III	0.5	Vel OB2
36486	δ Ori	2.2	O9.5II	0.5	Ori OB1
66811	ζ Pup	2.3	O4I	0.45	Поле
149757	ζ Oph	2.6	O9.5V	0.14	Убежавшая
37043	ι Ori	2.8	O9III	0.5	Ori OB1
36861	λ Ori	3.4	O9.5II	0.5	Ori OB1
37468	σ Ori	3.8	O9.5V	0.5	Ori OB1
24912	ζ Per	4.0	O7.5IIIe	0.51	Убежавшая
30614	α Cam	4.3	O9.5Iae	1.2	Убежавшая
57061	τ CMa	4.4	O9II	1.5	NGC 2362
47839	S Mon	4.7	O7V	0.72	Mon OB1
149038	μ Nor	4.9	O9.7Iab	1.4	Ara OB1a
57060	UW CMa	5.0	O7.5—O8Iab	1.5	NGC 2362
203064	V1809 Cyg	5.0	O7.5III	0.88	Убежавшая
210839	λ Cep	5.0	O6I	0.86	Убежавшая
37022	θ^1 Ori	5.1	O6—O4p	0.5	Ori OB1
37041	θ^2 Ori	5.1	O9.5Vpe	0.5	Ori OB1
75821	KX Vel	5.1	O9.5II	1.8	Vel OB1
135240	δ Cir	5.1	O7.5III	0.92	Поле
209975	19 Cep	5.1	O9.5Ib	0.91	Cep OB2
38666	μ Col	5.2	O9.5V	0.75	Убежавшая
167264	15 Sgr	5.4	O9.7Iab	1.7	Sgr OB7
113904	θ Mus	5.5	O9.5Iab	2.4	Cen OB1
135591		5.5	O7.5III	1.1	Поле
149404	V918 Sco	5.5	O8.5I	1.4	Ara OB1a
155806		5.5	O7.5V	1.2	Sco OB4
150136		5.6	O5III	1.4	Ara OB1a
188209		5.6	O9.5Iab	2.0	Поле
209481	LZ Cep	5.6	O8.5III	0.91	Cep OB2
159176	V1036 Sco	5.7	O7V	1.3	NGC 6383
206267		5.7	O6.5V	0.91	Cep OB2
152408		5.8	O8I	1.9	Sco OB1

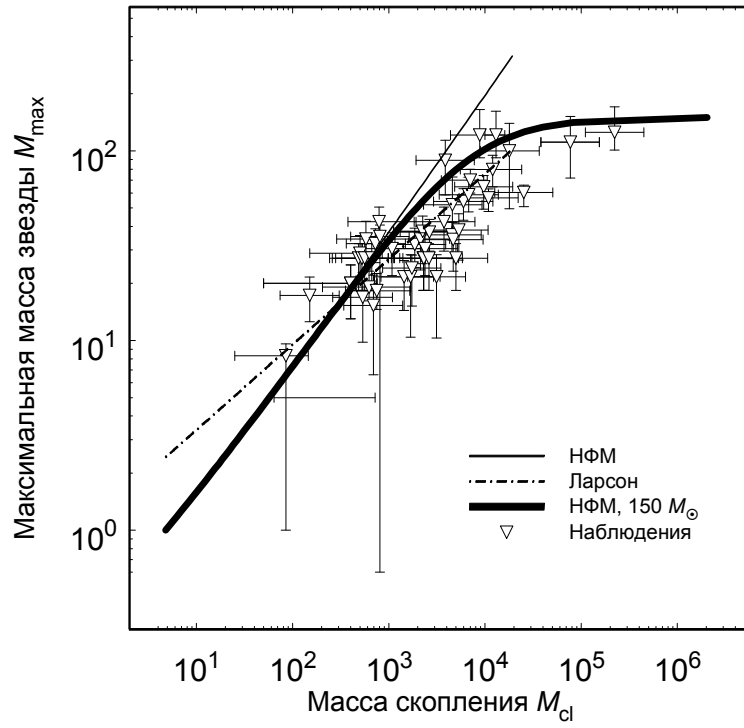


Рис. 3. Зависимость массы самой массивной звезды от массы скопления

когда звездные массы ограничены сверху значением $150 M_{\odot}$. Штрихпунктирная линия соответствует эмпирическому соотношению Ларсона [18], а треугольниками показаны данные наблюдений, обобщенные в работе [19]. Видно, что в богатых скоплениях ($M_{cl} > 10^3 M_{\odot}$) масса наиболее массивной звезды оказывается меньше теоретически возможного значения, соответствующего случаю, когда распределение звезд скопления по массам определяется исключительно НФМ. Иными словами, данные на рис. 3 свидетельствуют в пользу наличия механизма, ограничивающего максимальную массу звезд в богатых скоплениях.

Еще один вывод, который можно сделать на основании рис. 3, состоит в том, что существует фундаментальное верхнее ограничение на массу звезды, равное примерно $150 M_{\odot}$. Еще несколько лет

назад высказывались предположения, что отсутствие звезд с массами, равными нескольким сотням солнечных масс, есть отражение отсутствия достаточно массивных комплексов звездообразования, в которых НФМ допускала бы существование таких гигантов. Однако в последнее время проведены детальные исследования таких массивных областей звездообразования, как, например, скопление Arches в нашей Галактике и R136 в БМО. Эти исследования показывают, что ни в одном подобном объекте мы не видим звезд с массами выше $130\text{--}150 M_{\odot}$, хотя НФМ Солпитера допускает существование в скоплении Arches звезд с массой около $400 M_{\odot}$ [20], а в скоплении R136 — звезд с массой до $750 M_{\odot}$ [21]. Таким образом, в настоящее время наличие верхнего предела звездных масс представляется реальным. При этом нужно иметь в виду, что величина его, по всей видимости, одна и та же в Галактике и в БМО — в системах с существенно различной металличностью. Природа этого ограничения пока неясна, но в целом оно может обуславливаться тремя факторами: возможностью *существования* массивной звезды, возможностью *образования* одиночной массивной звезды и возможностью *образования* массивной звезды в *скоплении*.

Живи быстро, умри молодым

Ключевая особенность массивных звезд состоит в том, что они очень быстро эволюционируют. Для звезды с массой порядка $10\text{--}15 M_{\odot}$ время жизни составляет порядка 12 млн лет, а для светил, масса которых превышает $100 M_{\odot}$, оно сокращается до $2\text{--}3$ млн лет [22]. Это время сопоставимо или уступает типичному времени жизни молекулярного облака. Поэтому массивная звезда либо большую часть своей жизни, либо всю ее целиком проводит в той области звездообразования, в которой она образовалась. В результате на эволюции области звездообразования сказывается не только процесс образования массивной звезды, но и ее жизнь, и смерть — через мощное излучение, звездный ветер и последующую вспышку сверхновой. Именно способность взорваться как сверхновая и является главным видовым признаком массивной звезды.

Массивными считаются звезды, начальная масса которых превышает примерно $10 M_{\odot}$. Но это разделение — не просто дань круглому числу. Звезды по разные стороны этого предела проживают существенно разные жизни. Точнее, начинается все одинаково — с горения водорода в ядре. Но у звезд малых и промежуточных масс

термоядерный синтез не заходит дальше углерода. Точнее, у звезд с массами ниже нескольких десятых массы Солнца все заканчивается на синтезе гелия, в звездах с массами от нескольких десятых до 2—3 масс Солнца гелий уже способен частично превратиться в углерод, в интервале от 2—3 до 6—8 масс Солнца происходит горение гелия с образованием углерода и синтез гелия и углерода с образованием кислорода. Наконец, в звездах с массами до 9—11 M_{\odot} происходит уже горение углерода с образованием магния и неона. Во всех перечисленных случаях итогом эволюции звезды становится образование гелиевого, углеродного, углеродно-кислородного или кислородно-неоново-магниевого белого карлика — вырожденно-го объекта массой до 1.4 M_{\odot} .

У более массивных звезд все иначе. В них цепочка термоядерного синтеза проходит вплоть до железа, и заканчивают они свой жизненный путь катастрофой, которая сопровождается вспышкой сверхновой, возможно, гамма-всплеском и образованием нейтронной звезды или черной дыры. К сожалению, в исследованиях массивных звезд остается еще очень много белых пятен, что связано как со сложностями в их моделировании, так и наблюдательными проблемами. В силу высокой яркости массивных звезд существенную роль в них играет взаимодействие вещества и излучения. В результате, существенным динамическим фактором в эволюции массивной звезды становится звездный ветер, действие которого в частности приводит к тому, что конечная масса звезды может очень существенно отличаться от ее начальной массы. Действие ветра отягощается другими динамическими явлениями — вращением и конвекцией. Распределение температуры по звезде существенно зависит от сложных многоступенчатых цепочек термоядерных и ядерных реакций (о них чуть ниже), параметры которых иногда известны с очень невысокой точностью. Наконец, массивных звезд мало, как уже говорилось, значит, все они далеки от нас, что, естественно, не упрощает их изучение.

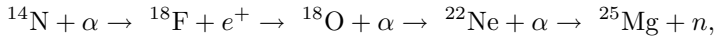
В целом, эволюцию массивной звезды можно представить как последовательное горение водорода, гелия, углерода, неона, кислорода и кремния [23]. Продолжительность соответствующих этапов для звезд с массами 13 и 75 M_{\odot} приводится в табл. 2.

Поначалу в звезде горит водород, но по мере истощения его запасов в ядре начинаются термоядерные реакции с участием гелия, в ходе которых три ядра гелия сливаются в ядро углерода. Последующее слияние ядер гелия с ядрами углерода приводит еще и к образованию кислорода. Именно эти реакции обеспечивают выделе-

Таблица 2. Продолжительность различных этапов термоядерного горения в ядрах звезд с массой 13 и 75 M_{\odot} [23]

Этап	13 M_{\odot}	75 M_{\odot}
Горение водорода	13 млн лет	3 млн лет
Горение гелия	2.7 млн лет	0.5 млн лет
Горение углерода	2.8 тыс. лет	1 тыс. лет
Горение неона	0.3 года	0.57 года
Горение кислорода	4.8 года	0.9 года
Горение кремния	18 дней	2 дня

ние энергии, но попутно идут и другие реакции, обеспечивающие химическое многообразие среды, например, цепочка реакций



начинающаяся со слияния альфа-частицы с ядром азота и приводящая к появлению в среде свободных нейтронов, что активизирует синтез новых элементов в результате s-процесса (медленного захвата нейтронов).

Следующий этап — горение углерода. Слияние двух ядер ^{12}C приводит к образованию возбужденного ядра магния, которое распадается с появлением ядер ^{23}Mg , ^{20}Ne и ^{23}Na . По окончании этапа горения углерода ядро звезды состоит из кислорода, неона и магния. Затем наступает кратковременный этап горения неона, однако прямой реакции слияния двух ядер неона нет. Вместо нее идет цепочка реакций, в результате которой два ядра неона превращаются в ядра кислорода и магния.

На этапе горения кислорода два ядра ^{16}O сливаются в возбужденное ядро серы-32, которое распадается с образованием ядер ^{31}S , ^{28}Si , ^{31}P и ^{30}P . Попутно происходит дальнейшее обогащение среды нейтронами, а также фотодезинтеграция тяжелых элементов s-процесса, рожденных на предыдущих этапах.

Последний этап термоядерной эволюции звезды — горение кремния. Оно, так же, как и горение неона, происходит лишь эффективно. Прямой реакции $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ нет. Сначала поглощение гамма-квантов ядрами кремния приводит к их разрушению до углерода и обогащению смеси ядрами гелия. Затем последовательное поглощение ядер гелия ядрами углерода, кислорода, неона и пр. приводит к образованию железа, хрома и других элементов железного пика.

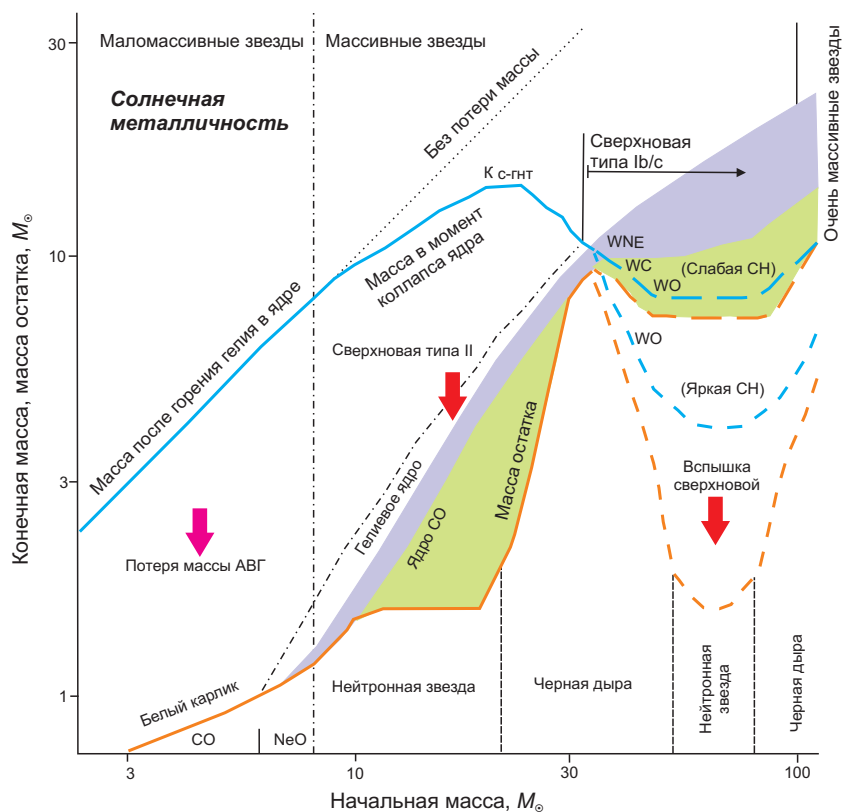


Рис. 4. Зависимость конечной массы и судьбы звезды солнечной металличности от ее начальной массы [23]

На этом термоядерная эволюция звезды заканчивается. В этот момент она состоит из железного ядра, окруженного слоевыми источниками, в которых продолжают предыдущие этапы термоядерного горения. Дальнейшая судьба звезды зависит от массы ее ядра. При этом простого соотношения между начальной и конечной массой звезды не существует, по крайней мере, для звезд солнечной металличности.

Примерные эволюционные итоги для звезд различных начальных масс показаны на рис. 4. Верхней сплошной линией показана масса звезды в момент прекращения термоядерных реакций, нижней

сплошной линией — масса остатка (нейтронной звезды или черной дыры). Из рис. 4 хорошо видно, какую важную роль в эволюции массивной звезды могут играть звездный ветер и связанная с ним потеря массы. Во-первых, независимо от начальной массы в момент коллапса ядра масса звезды не превышает примерно $12 M_{\odot}$. Во-вторых, изначально более массивные звезды теряют в весе больше, чем менее массивные. В некоторых расчетах при начальной массе около $50 M_{\odot}$ звездный ветер оказывается столь интенсивным, что конечным продуктом эволюции звезды является нейтронная звезда, а не черная дыра, как в звездах меньших масс.

Эволюционные сценарии для массивных звезд показаны на рис. 5. Звезды с массами менее $17\text{--}20 M_{\odot}$ после главной последовательности превращаются в красные сверхгиганты (RSG). Ранее предполагалось, что после этой стадии звезда сразу же взрывается как сверхновая II типа. Однако учет потери массы и вращения показывает, что после стадии красного сверхгиганта звезда, сбрасывая оболочку и открывая более горячие внутренние слои, может превращаться в голубой сверхгигант. Именно поэтому, в частности, голубым, а не красным сверхгигантом оказался предшественник сверхновой 1987A.

У более массивных звезд, с начальными массами до $30\text{--}40 M_{\odot}$, потеря вещества на стадии красного гиганта оказывается настолько интенсивной, что звезда практически полностью лишается оболочки, содержащей «непереработанный» водород. Видимым становится вещество, обогащенное продуктами термоядерного горения. Поскольку температура его очень высока и может превышать 10^5 K, звезда на диаграмме ГР смещается левее верхней части главной последовательности и наблюдается как звезда Вольфа—Райе (WR) — без линий водорода, но с линиями углерода, азота или кислорода, в зависимости от того, насколько глубокие слои вскрылись из-за сброса вещества. Интересно, что после этого многие звезды Вольфа—Райе можно называть массивными лишь в память о былых заслугах, так как их окончательные массы могут быть и меньше $10 M_{\odot}$.

Наконец, у самых массивных звезд вещество теряется настолько быстро, что они не успевают стать красными сверхгигантами (точнее, уже гипергигантами). По всей видимости, их движение в «холодную» часть диаграммы ГР закачивается в области желтых сверхгигантов. При этом на определенном этапе эволюции после ГП

в звезде развивается неустойчивость, и она на какое-то время становится яркой голубой переменной, с тем чтобы в конечном итоге тоже превратиться в звезду Вольфа—Райе. Впрочем, не исключается и возможность вспышки еще на стадии LBV [24].

Рождение массивных звезд

Выше говорилось о том, что наблюдаемые звездные массы ограничены сверху значением порядка $150 M_{\odot}$ [25], которое, по всей видимости, не связано с ограничениями, накладываемыми НФМ (при условии, что она не отличается значительно от НФМ Солпитера). Это означает, что имеется некий фактор, препятствующий либо существованию, либо формированию звезд большей массы. Поскольку расчеты структуры массивных звезд, в принципе, допускают существование звезд с массами порядка сотен солнечных, ограничение, вероятно, связано именно с этапом образования звезды.

В этом нет ничего особо удивительного: уже давно высказано предположение о том, что максимальная масса формирующейся звезды ограничена ее собственной светимостью [26]. Характерное время сжатия звезды определяется временем Кельвина—Гельмгольца, которое, начиная с некоторой массы, становится меньше характерного времени аккреции. Иными словами, в достаточно массивной звезде термоядерные реакции начинаются еще до того, как закончится аккреция вещества на нее. При этом возросшая светимость звезды должна остановить аккрецию. Величина этой предельной массы по разным оценкам варьируется от 10 до $40 M_{\odot}$ [27], однако она в любом случае существенно меньше наблюдаемого верхнего предела звездных масс. Это расхождение стало основой для предположения о *бимодальности* звездообразования, то есть о различных механизмах образования маломассивных и массивных звезд. Сейчас рассматривается два основных подхода к этой проблеме.

В первом случае учитывается тот факт, что массивные звезды образуются в скоплениях. Поэтому естественно предположить, что на массу образующихся звезд каким-то образом влияют эффекты окружения. В модели конкурентной аккреции предполагается, что звезда набирает массу в процессе движения по родительскому облаку. Причем, чем массивнее становится звезда, тем эффективнее она стягивает на себя вещество (в режиме аккреции Бонди—Хойла). В наиболее плотных скоплениях массивная молодая протозвезда может захватывать не только газ, но и другие протозвезды. Правда, чтобы

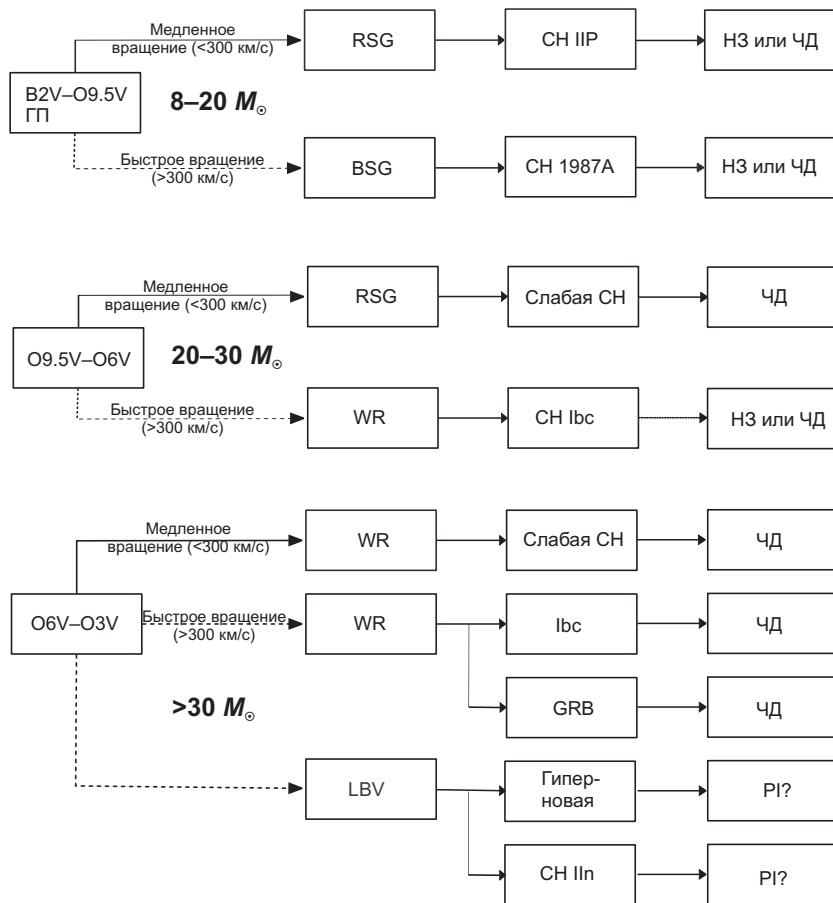


Рис. 5. Эволюционные сценарии для массивных звезд разных начальных масс [24]

начал действовать механизм слияний, звездная плотность должна на два порядка превышать максимальную наблюдаемую звездную плотность в реальных скоплениях.

Во втором случае предполагается, что в результате действия каких-то факторов падающему на протозвезду веществу удастся все-таки преодолеть давление излучения и расширение ионизованного звездой газа. Такое возможно, например, если темп аккреции очень велик, порядка $10^{-2} M_{\odot}$ в год (для сравнения, темп аккреции на маломассивную звезду составляет порядка $10^{-6} M_{\odot}$ в год). Решение этой проблемы может также лежать в учете неоднородности аккреции. Например, максимально возможную массу протозвезды можно увеличить, если предположить, что аккреция идет не сферически-симметрично, а через окружающий звезду диск [28]. Еще более эффективной аккреция становится в трехмерных расчетах: неустойчивость, подобная неустойчивости Релея—Тейлора разбивает падающее на звезду вещество и разделяет его на волокна и пустоты. При этом излучение уходит от звезды через пустоты, а вещество продолжает стекать на звезду через волокна и более сложные структуры [29]. С наблюдательной точки зрения такой режим более предпочтителен, чем чисто дисковая аккреция, поскольку попытки обнаружить аккреционные диски у массивных протозвезд пока особым успехом не увенчались [30]. В целом, можно сказать, что выявление структуры газа в непосредственных окрестностях будущих массивных звезд — одна из актуальнейших астрофизических задач.

Другая задача, не менее актуальная, заключается в поиске объектов, которые были бы массивными аналогами дозвездных ядер, то есть молекулярных облаков, которые в будущем должны стать массивными звездами и их скоплениями. В настоящее время наиболее подходящими кандидатами на эту роль считаются так называемые инфракрасные темные облака, которые были обнаружены в инфракрасных обзорах плоскости Галактики при помощи космических телескопов ISO и MSX [31]. Эти облака, подобно глобулам Бока, видны как темные силуэты на фоне галактического диффузного излучения в диапазоне длин волн порядка нескольких микрон.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-00454 и 10-02-00612.

Список литературы

1. *Salpeter E. E.* The luminosity function and stellar evolution // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 161.
2. *Sota A., Maíz-Apellániz J., Walborn N. R., Shida R. Y.* The Galactic O Star Catalog v.2.0. — 2008. — Vol. 33, Ser. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series.* — P. 56.
3. *Schröder S. E., Kaper L., Lamers H. J. G. L. M., Brown A. G. A.* On the Hipparcos parallaxes of O stars // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 428. — P. 149.
4. *Niemela V. S., Gamen R. C.* The nearest star of spectral type O3: a component of the multiple system HD 150136 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 356. — P. 974.
5. *Walborn N. R., Howarth I. D., Lennon D. J. et al.* A new spectral classification system for the earliest O Stars: definition of type O2 // *Astron. J.* — 2002. — Vol. 123. — P. 2754.
6. *de Jager C.* The yellow hypergiants // *Astron. Astrophys. Rev.* — 1998. — Vol. 8. — P. 145.
7. *Vanbeveren D., De Loore C., Van Rensbergen W.* Massive stars // *Astron. Astrophys. Rev.* — 1998. — Vol. 9. — P. 63—152.
8. *Perrin G., Ridgway S. T., Coudé du Foresto V. et al.* Interferometric observations of the supergiant stars α Orionis and α Herculis with FLUOR at IOTA // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 418. — P. 675.
9. *Wing R. F.* The biggest stars of all // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* / Ed. by D. G. Luttermoser, B. J. Smith, & R. E. Stencel: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — Vol. 412. — 2009. — P. 113.
10. *Levesque E.* Physical properties of red supergiants // *Hot and cool: bridging gaps in massive star evolution* / Ed. by C. Leither, Ph. Benet, P. Morris, & J. van Loon: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 2010. — In press. arXiv:astro-ph/0902.2789.
11. *Vink J. S.* Eta Carinae and the luminous blue variables // *ArXiv e-prints.* — 2009. 0905.3338.
12. *Mason B. D., Gies D. R., Hartkopf W. I. et al.* ICCD speckle observations of binary stars. XIX — an astrometric/spectroscopic survey of O stars // *Astron. J.* — 1998. — Vol. 115. — P. 821.

13. *Reed B. C.* Catalog of Galactic OB Stars // *Astron. J.* — 2003. — Vol. 125. — P. 2531.
14. *de Wit W. J., Testi L., Palla F., Zinnecker H.* The origin of massive O-type field stars: II. Field O stars as runaways // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 437. — P. 247.
15. *Chu Y., Gruendl R. A.* Were all massive stars born in OB associations and clusters? // *Massive Star Formation: Observations Confront Theory* / Ed. by H. Beuther, H. Linz, & T. Henning: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — Vol. 387. — 2008. — P. 415.
16. *Crowther P. A.* Physical properties of Wolf-Rayet stars // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 177.
17. *Parker R. J., Goodwin S. P.* Do O-stars form in isolation? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 380. — P. 1271.
18. *Larson R. B.* The stellar initial mass function and beyond // *Galactic Star Formation Across the Stellar Mass Spectrum* / Ed. by J. M. De Buizer & N. S. van der Blik: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — Vol. 287. — 2003. — P. 65.
19. *Weidner C., Kroupa P., Bonnell I. A. D.* The relation between the most-massive star and its parental star cluster mass // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 401. — P. 275.
20. *Figer D. F.* An upper limit to the masses of stars // *Nature.* — 2005. — Vol. 434. — P. 192.
21. *Weidner C., Kroupa P.* Evidence for a fundamental stellar upper mass limit from clustered star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 348. — P. 187.
22. *Meynet G., Maeder A., Schaller G. et al.* Grids of massive stars with high mass loss rates. V. From 12 to 120 M_{\odot} at $Z = 0.001, 0.004, 0.008, 0.020$ and 0.040 // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 103. — P. 97.
23. *Woosley S. E., Heger A., Weaver T. A.* The evolution and explosion of massive stars // *Reviews of Modern Physics.* — 2002. — Vol. 74. — P. 1015.
24. *Smartt S. J.* Progenitors of core-collapse supernovae // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 47. — P. 63.
25. *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward understanding massive star formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 481.

26. *Kahn F. D.* Cocoon around early-type stars // *Astron. Astrophys.* — 1974. — Vol. 37. — P. 149.
27. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of star formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565.
28. *Yorke H. W., Sonnhalter C.* On the formation of massive stars // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 569. — P. 846.
29. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F. et al.* The formation of massive star systems by accretion // *Science.* — 2009. — Vol. 323. — P. 754.
30. *Beuther H., Walsh A. J., Longmore S. N.* Hot high-mass accretion disk candidates // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2009. — Vol. 184. — P. 366.
31. *Simon R., Jackson J. M., Rathborne J. M., Chambers E. T.* A Catalog of Midcourse Space Experiment Infrared Dark Cloud Candidates // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 639. — P. 227.

О ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОЛЬЗЕ ТЕОРИИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Нет ничего практичнее хорошей теории.
Роберт Кирхгоф

Введение

Ученый, занимающийся фундаментальными исследованиями, всегда немножко завидует «прикладникам», поскольку они могут увидеть плоды своего труда, могут убедиться, что сделали что-то полезное (или бесполезное), а он только надеется, что когда-нибудь его результаты окажутся востребованными. . . «А зачем это нужно?» — спрашивали меня приятели, когда я рассказывал им, что занимаюсь теорией звездообразования. «Пока не нужно» — отвечал я — «но в далеком будущем это может пригодиться!» Я верил и работал, и понял, наконец, что теория звездообразования полезна чрезвычайно и что ученые ее развивающие — потенциальные спасители человечества, как и остальные астрономы/астрофизики.

А идея простая. Не исключено, что в ходе космического путешествия человечества вместе с Солнцем вокруг центра Галактики вблизи нас окажется массивное протозвездное облако. За 10^4 лет оно может породить массивную звезду, которая выльет на человечество смертоносную радиацию: на стадии главной последовательности и/или во время вспышки сверхновой. В своей выдающейся книге «Выбор катастроф» Айзек Азимов [1] не предусмотрел такой опасности, но по его классификации близкое рождение массивной звезды угрожает всей солнечной системе и поэтому относится к катастрофам второго класса. Поскольку в Галактике есть турбулентные (хаотичные) движения, такую катастрофу можно ожидать в любом тысячелетии. Специалисты по звездообразованию — звездные акушеры-гинекологи — будут стоять на страже солнечной системы (или другой обжитой нами системы): они не только предскажут характеристики звезд, рождающихся на нашем пути, но и скорректируют «беременность» протозвездного облака, чтобы оно не породило звезд-монстров.

В этой лекции мы рассмотрим некоторые проблемы прогноза и коррекции звездообразования в конкретном протозвездном облаке.

Прогнозирование звездообразования

История показывает, что наука развивается от объяснения явлений к их предсказанию и управлению. Например, метеорологи уже не просто прогнозируют погоду, но и пытаются управлять выпадением осадков. А специалисты по солнечно-земной физике все более успешно прогнозируют солнечные вспышки и магнитные бури, создают искусственные полярные сияния. Возможно, уже в этом веке они научатся отводить от Земли плазменные пучки и ударные волны, порожденные солнечной активностью.

Хочется верить, что теория звездообразования тоже когда-нибудь дорастет до уровня практического использования. Но сначала она должна достичь уровня успешного прогнозирования. Для этого необходимо решить ряд сложных проблем, в частности, выяснить, какова предельная точность прогнозов отдельных этапов звездообразования и как ошибка зависит от временной шкалы (длительности) прогноза.

Вероятно, все хотя бы раз ругали метеорологов за ошибочный прогноз погоды. Но не все задумывались, почему погода бывает так непредсказуема. В 1944 г. молодой советский физик Николай Сергеевич Крылов опубликовал в *Nature* небольшую статью [2], где впервые показал, что при неустойчивом движении исходная неточность со временем нарастает и дальнейшее состояние системы уже невозможно предвидеть. Такое свойство системы называется чувствительной зависимостью от начальных условий, и приводит оно к динамическому хаосу — сложному, запутанному и на вид случайному поведению. В 50-ые гг. прошлого века метеорологи осознали, что динамический хаос свойственен атмосферным течениям, поскольку из-за большого числа Рейнольдса они неустойчивы. Это первая причина плохой предсказуемости погоды. Второй причиной является неполнота начальных данных: состояние атмосферы измеряется лишь в некоторых ее точках, куда добрались метеорологи, метеозонды или метеоспутники. Третьей причиной являются чисто случайные процессы: выпадение осадков, рост растительности, извержения вулканов, пожары и т. д. Четвертая причина — несовершенство прогностических моделей: неучет каких-либо эффектов, необходимость задавать граничные условия, погрешности численных методов и др. В итоге, интервал детерминированной предсказуемости погоды

не превышает двух недель. Ошибка более долгосрочных прогнозов мгновенного состояния атмосферы в той или иной точке сопоставима с ошибкой случайного прогноза. Поэтому на длительный срок метеорологи предсказывают лишь статистические характеристики погоды, например, среднесуточные значения температуры.

Для оценки неустойчивости атмосферных течений и учета неполноты начальных данных метеорологи используют метод «ансамблевого прогноза». В 1965 г. американский метеоролог Эдуард Лоренц предложил [3] проводить не один расчет эволюции атмосферы, а большое количество (ансамбль) расчетов, слегка отличающихся начальными условиями. При этом важно, чтобы разброс в начальных условиях соответствовал неопределенности начальных данных. Если решения расходятся не сильно, то атмосферная ситуация устойчива и прогноз имеет высокую степень достоверности. В противном случае, извините, атмосфера «взбесилась» и прогноз ненадежен.

В наше время используется несколько вариантов ансамблевого прогнозирования. Варьируются не только начальные условия, но и параметры модели, или даже сравниваются прогнозы, полученные с помощью разных моделей. Этот подход позволяет уменьшить ошибки, вызванные несовершенством моделей. Некоторые метеоцентры используют «ансамбль бедного человека» — совокупность решений, любезно предоставленных более богатыми метеоцентрами.

Прогнозирование звездообразования в конкретном протозвездном облаке является не менее трудной задачей, чем прогнозирование погоды.

- Во-первых, скорости крупномасштабных течений в протозвездных облаках сравнимы со скоростью звука, а размер намного превышает длину свободного пробега частиц газа. Поэтому число Рейнольдса для этих течений огромно, они сильно неустойчивы и легко становятся турбулентными. Для примера, на рис. 1 показано начальное распределение плотности и скорости в плоскости $z = 0$ в трехмерной модели турбулентного вращающегося протозвездного облака.
- Во-вторых, никакая космическая томография (см. [4]) не сможет точно определить начальное распределение физических величин в облаке. Ошибки в начальных условиях дадут сильное отклонение решения от «истинного». Но есть и хорошая новость: диффузионные процессы, например, омическая и амбиполярная диффузии, снижают неустойчивость течения и повышают точность прогнозирования.

- В-третьих, многие факторы эволюции протозвездных облаков испытывают случайные вариации. Например, спектр космических лучей модулируется из-за флуктуаций магнитного поля межзвездной среды, а спектр излучения соседних звезд — из-за флуктуаций ее плотности. Кроме того, невозможно предугадать, какие ударные волны и другие нелинейные волны войдут в облако. Поэтому корректно задать граничные условия в модели облака гораздо труднее, чем в модели земной атмосферы.
- В-четвертых, прогностические модели звездообразования будут более сложными, чем прогностические модели метеорологии. Одна из главных проблем — сильная неоднородность коллапсирующего облака: перепад плотности 15 порядков, перепад температуры 5 порядков. Еще одна сложность — необходимо рассчитывать самогравитацию, что резко снижает скорость численного моделирования. Для расчета эволюции магнитного поля и переноса излучения необходимо моделировать множество химических реакций, а также рост, разрушение и зарядовое состояние пылинок. Ясно, что столь сложные модели будут еще менее совершенными, чем модели атмосферы и океана.

Итак, предыдущий анализ, показал, что точный прогноз эволюции конкретного протозвездного облака невозможен. Да это и не нужно. Нас интересует результат эволюции — звезды, а еще конкретнее — интервалы, в которых окажутся характеристики этих звезд, в первую очередь, их массы. Будем надеяться, что астрофизики будущего научатся предсказывать интервал звездных масс с такой точностью, что их прапра... правнукам не будет стыдно.

Коррекция звездообразования

Перейдем теперь к проблеме коррекции звездообразования. В отличие от прогнозирования эта тема уже ближе к научной фантастике. Но история показывает, что некоторые мечты фантастов сбываются. Почему лишь коррекция, а не полноценное управление? Потому, что для управления надо слишком много энергии, это слишком тяжелый труд. Для начала надо научиться хотя бы корректировать звездообразование, то есть подталкивать его в нужном направлении в нужное время.

Первое, что приходит в голову гражданину ядерной державы — взорвать опасное протозвездное облако термоядерными бомбами.

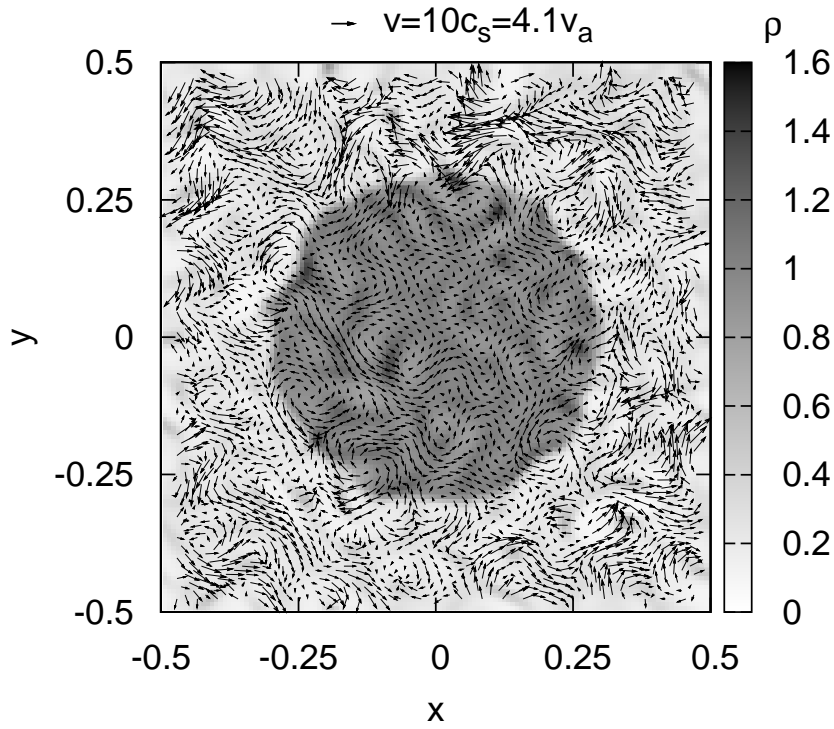


Рис. 1. Начальное распределение плотности и скорости в плоскости $z = 0$ в трехмерной модели турбулентного вращающегося протозвездного облака

Но облако — не астероид. Модуль гравитационной энергии облака с массой $M = 100 M_{\odot}$ и радиусом $R = 0.5$ пк есть $E_g \simeq GM^2/R \approx 10^{45}$ эрг. Поэтому для грубого расталкивания такого облака понадобится взорвать бомбы с суммарной массой заряда $m > 10^3 E_g c^{-2}$, что близко к массе Земли. Роботы залетят внутрь ненавистного облака, накачают водород в бомбы и одновременно взорвут их. Главное, чтобы роботы успели сделать это до того, как человечество окажется в зоне поражения.

Второй, более элегантный и контролируемый способ коррекции — с помощью сверхпроводящих кабелей создать в облаке дополнительное магнитное поле, которое отвернет плазменные потоки от места

встречи в центре облака. Они разминутся на этом перекрестке, как автомобили на многоуровневой развязке, и никогда не сольются в звезду-монстра. Недостатком этого подхода является сложность реализации и, опять же, высокие энергозатраты: ведь энергия магнитного поля должна быть сопоставима с E_g .

В третьем способе используется эффект гравитационной фрагментации вращающегося облака. Роботы должны как-то раскрутить облако до нужной скорости. Согласно исследованиям Мачиды и др. [5], для образования тесной двойной системы (0.01 а. е.) в облаке с реалистичным магнитным полем достаточно, чтобы энергия вращения составляла $10^{-3}E_g$. В этом способе важно обеспечить приблизительное равенство масс компаньонов, поскольку при этом масса каждой звезды максимально отличается от массы одиночной звезды. В этом способе энергозатраты на три порядка меньше, чем при подрыве облака, но выше сложность. Возможно, для раскрутки облака все же придется проводить термоядерные взрывы: в туннелях (областях пониженной плотности), выходящих в нужном направлении.

Четвертый способ похож на предыдущий: надо добиться фрагментации облака на небольшие части. Вращение облака вызывать необязательно. Главное — превратить облако в почти бесстолкновительную систему. Тогда фрагменты разминутся в центре уже без магнитной «дорожной развязки», и звезда не родится. Этот способ красив, но труден в реализации и, похоже, требует много энергии.

Последние два способа также основаны на фрагментации, но, вероятно, требуют меньше энергии, чем предыдущие. Способ номер пять — стимулировать тепловую неустойчивость среды — может сработать на ранних этапах коллапса протозвездного облака, когда космические лучи еще проникают внутрь и нагревают газопылевую среду. Тепловая неустойчивость разбивает среду на множество холодных комочков, окруженных более горячими разреженными областями. Если эти комочки достаточно легкие, они не смогут стать зародышами массивных звезд.

Способ номер шесть — уменьшение удельной непрозрачности вещества — может сработать на продвинутых стадиях коллапса протозвездного облака, когда его фрагменты становятся непрозрачны для собственного теплового излучения. Если уменьшить удельную непрозрачность вещества, то массы фрагментов также уменьшаются (см. [6]).

Таблица 1. Как предотвратить образование массивной звезды

Способ	Преимущества	Недостатки
Подрыв облака изнутри	Простой принцип	Большая масса ядерного заряда ($m > 10^3 E_g c^{-2}$), радиация от взрыва
Создание магнитной «дорожной развязки»	Красиво, возможность контроля	Сложно, высокие энергозатраты
Раскрутка облака для фрагментации	Нужно меньше энергии, чем в предыдущих способах	Сложно
Собрать газ в небольшие комки	Бесстолкновительная система	Высокие энергозатраты(?), сложно
Стимуляция тепловой неустойчивости	Малые энергозатраты	Сложно
Уменьшение удельной непрозрачности	Малые энергозатраты	Сложно

А теперь *домашнее задание*: оцените необходимые энергозатраты и время работы роботов для всех вышеизложенных способов предотвращения образования массивной звезды (см. таблицу). Если придумаете более совершенные способы, расскажите!

Вы, конечно, можете возразить: зачем предотвращать образование массивной звезды? Может, проще скорректировать орбиту Солнца? Или спрятать обитаемые планеты в защитные оболочки? Посчитайте, что выгодней.

Заключение

Модели эволюции протозвездных облаков пока гораздо менее совершенны, чем прогностические модели метеорологии. Да, погода интересна всем, на ее предсказание выделяются огромные ресурсы, а кому интересна теория звездообразования? К счастью, некоторым землянам она интересна, поэтому у человечества появляется надежда не быть поджаренными молодой горячей звездой.

Теперь я могу с гордостью написать в анкете, что мои исследования способствуют развитию критических технологий, а именно технологий снижения риска и уменьшения последствий природных катастроф.

Хочется обратить внимание преподавателей астрофизики: решение задач о предотвращении образования массивной звезды — увлекательный способ изучения теории звездообразования.

Завершить лекцию хочется двумя цитатами.

К. Э. Циолковский:

«... нас ждут бездны открытий и мудрости. Будем жить, чтобы получить их и царствовать во Вселенной, подобно другим бессмертным».

А. Азимов [1]:

«...если мы поймем, что нашими врагами являются совсем не соседи, а нищета, невежество и холодное безразличие к законам природы, — то все стоящие перед нами проблемы можно решить. Можно обдуманно сделать выбор и в итоге избежать катастроф».

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт 02.740.11.0247) и Федерального агентства по образованию в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/6711).

Список литературы

1. Азимов А. Выбор катастроф. — СПб.: Амфора, 2001.
2. Krylov N. S. Relaxation Processes in Statistical Systems // Nature. — 1965. — Vol. 153. — P. 709.
3. Lorenz E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model // Tellus. — 1965. — Vol. 17. — P. 321.
4. Бочаров А. А., Шапировская Н. Я. Межзвездная рассеивающая среда: распределение, восстановленное с помощью межзвездной томографии // Письма в Астрон. журн. — 1988. — Vol. 14. — P. 963.
5. Machida M. N., Tomisaka K., Matsumoto T., Inutsuka S. Formation scenario for wide and close binary systems // Astrophys. J. — 2008. — Vol. 677. — P. 327.
6. Goodwin S. P., Kroupa P., Goodman A., Burkert A. The fragmentation of cores and the initial binary population // Protostars and Planets V. — 2007. — P. 133.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И НОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия является уникальным инструментом исследования внутренних областей плотных межзвездных облаков, в которых происходит образование новых звезд. В то же время наблюдения в этом диапазоне дают бесценную информацию и для многих других областей астрофизики. Новые наземные и космические обсерватории этого диапазона, часть из которых уже недавно введена в эксплуатацию, обеспечивают значительно более высокие чувствительность и угловое разрешение по сравнению с прежними системами. В настоящем обзоре рассматриваются актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии и описываются новые радиотелескопы.

Millimeter and submillimeter wave astronomy is a unique tool for studies of the internal regions of dense interstellar clouds where new stars form. At the same time observations in this band yield an invaluable information for many other areas of astrophysics. New ground-based and space observatories part of which was recently put into operation provide much higher sensitivity and angular resolution in comparison with the previous systems. In this review we consider the present-day tasks of the millimeter and submillimeter astronomy and describe new facilities.

Введение

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия переживает период бурного развития. Построен и строится целый ряд крупных наземных инструментов этого диапазона. Однако, поскольку наблюдения с поверхности Земли ограничены несколькими «окнами прозрачности», осуществляются проекты космических субмиллиметровых телескопов. Большие надежды связаны с РСДБ измерениями

в данном диапазоне, особенно с использованием космических аппаратов. Они позволяют получить беспрецедентное угловое разрешение, требуемое, в частности, для изучения процессов, происходящих в активных ядрах галактик.

Ниже мы остановимся на актуальных задачах миллиметровой и субмиллиметровой астрономии, рассмотрим общие подходы к созданию радиотелескопов этого диапазона, а также некоторые конкретные примеры, и представим основные новые разработки в данной области. Более подробно эти вопросы рассмотрены в обзорах [1, 2].

Актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Большая часть миллиметровых и субмиллиметровых фотонов рождается в «холодной» Вселенной: плотных межзвездных газопылевых облаках, околозвездных оболочках и тому подобном. Этот диапазон чрезвычайно насыщен спектральными линиями, отвечающими, в основном, переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. Важно то, что межзвездные облака практически прозрачны на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, в отличие от оптического диапазона, где поглощение может достигать $\sim 100^m$ и более. Таким образом, наблюдения в данном диапазоне представляют собой уникальный инструмент исследования внутренних областей плотных межзвездных облаков, которые являются «колыбелями» новых звезд и недоступны для других методов астрономических исследований. Это и есть основной движущий фактор для миллиметровой и субмиллиметровой астрономии: исследования образования звезд и галактик. В то же время наблюдения в этом диапазоне дают бесценную информацию и для многих других областей астрофизики. Достаточно упомянуть результаты исследований микроволнового «реликтового» фона, которые прояснили основные вопросы происхождения и эволюции Вселенной, как целого, а также наблюдаемых структур во Вселенной.

К наиболее актуальным задачам миллиметровой и субмиллиметровой астрономии можно отнести следующее [1]:

Дальнейшие исследования микроволнового «реликтового» фона. Исследования этого фона сильно продвинулись вперед, благодаря использованию космических аппаратов. Измерения с очень

высокой точностью подтвердили планковский характер спектра фона. Кроме того, они позволили выявить его мелкомасштабную анизотропию и начать исследования ее пространственного спектра. Надежно зарегистрированы пики в этом спектре, которые связываются с акустическими колебаниями в первичной плазме. Актуальными задачами в ближайшие годы будут уточнение этого спектра, а также поиск поляризации фона. Обнаружение поляризации (или получение достаточно строгого предела) будет важным дополнительным тестом космологических моделей. Кроме того, интересным направлением работ является поиск спектральных линий, которые могут появиться из-за возможного присутствия некоторых молекул в так называемые «темные эпохи».

Исследования эффекта Сюняева—Зельдовича. Интересной и важной областью использования миллиметровых и субмиллиметровых волн в астрофизике является эффект Сюняева—Зельдовича (ЭСЗ). Это слабое искажение спектра фона за счет рассеяния фоновых фотонов на высокоэнергетичных электронах в скоплениях галактик. ЭСЗ проявляется как уменьшение интенсивности «реликтового» фона на частотах ниже ~ 218 ГГц и возрастание на более высоких частотах [3]. ЭСЗ дает важную информацию для космологии. Во-первых, — это независимая оценка расстояний до скоплений (с учетом рентгеновских данных), что в свою очередь позволяет оценивать постоянную Хаббла. Во-вторых, — возможность оценки массы газа в скоплении в сравнении с полной массой скопления, определяемой, например, по эффекту гравитационного линзирования.

Глубокие обзоры неба. Обзоры неба и подсчеты радиоисточников всегда были важным инструментом астрофизических исследований. Миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны пока мало использовались в этом отношении. В то же время потенциально они могут быть весьма информативны. В частности, они могут позволить измерения ЭСЗ на больших красных смещениях и, соответственно, исследования эволюции скоплений галактик. В субмиллиметровом диапазоне лежит пик излучения межзвездной пыли. Глубокие обзоры позволят выделить галактики с большим содержанием пыли и исследовать их свойства в зависимости от красного смещения. Обзоры важны для корректного учета вклада дискретных источников при исследованиях микроволнового фона.

Исследования звездообразования, в том числе на больших (космологических) расстояниях. Как отмечалось выше, основная научная задача миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — это исследования звездообразования. Несмотря на большой прогресс в этой области, остается много неясного. Особенно это касается образования звезд большой массы. Необходимо исследование процессов в ближайших окрестностях протозвезд. Кроме того, важно понять, каковы особенности звездообразования в эпоху появления первых звезд и галактик. Для детального изучения этих вопросов требуется более высокое угловое разрешение и чувствительность инструментов.

«Полные» спектральные обзоры, включая недоступные с поверхности Земли частоты. Наблюдения межзвездных молекул радикальным образом изменили представления о химии межзвездной среды. Но пока далеко не все наблюдаемые особенности находят свое объяснение. Астрохимические исследования в значительной мере базируются на спектральных обзорах, перекрывающих (по возможности, непрерывно) большие частотные интервалы. Существенным ограничением при этих обзорах является непрозрачность земной атмосферы в большей части субмиллиметрового диапазона.

Исследования тел Солнечной системы (Солнца, планет, комет). Роль миллиметровой и субмиллиметровой астрономии в исследованиях объектов Солнечной системы была и остается весьма значительной. В исследованиях Солнца — это изучение механизмов вспышек, а также структуры и динамики хромосферы. Важное значение имеет исследование планет и их атмосфер на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, особенно с использованием интерферометров, что позволяет изучать распределение тех или иных газов в атмосферах (например, воды на Марсе), температуры поверхности и пр. Имеются примеры успешных наблюдений молекулярных линий от комет, что дает уникальные сведения об их химическом составе.

Поиск и исследование протопланетных дисков и экзопланет. Вопросы формирования планетных систем, поиска и исследования экзопланет, особенно земного типа, являются одним из самых актуальных направлений исследований в астрофизике. К настоящему времени открыто уже около 300 экзопланет, наблюдаются около-

звездные диски. Новое поколение миллиметровых и субмиллиметровых инструментов должно позволить детальные исследования протопланетных дисков вокруг звезд и, по возможности, наблюдения экзопланет.

Основные подходы к созданию радиотелескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн

Большинство миллиметровых и субмиллиметровых телескопов являются универсальными инструментами, и круг научных задач для них очень широк. Как правило, он включает в себя наблюдения и точечных, и протяженных объектов, как в континууме, так и в спектральных линиях. Верхняя граница частотного диапазона определяется точностью поверхности антенны. Конкретные рабочие интервалы частот при наземных наблюдениях приходится выбирать с учетом поглощения радиоволн в атмосфере, которое очень велико в большей части этого диапазона, так что они привязаны к так называемым «окнам прозрачности» атмосферы. Для уменьшения влияния атмосферы эти радиотелескопы размещают либо высоко в горах, либо даже на самолетах, аэростатах и космических платформах.

Возможности радиотелескопа определяются, как антенной, так и установленными на ней приемниками излучения. Радиоастрономия предъявляет наиболее высокие требования к собственным шумам приемников, поскольку радиоастрономические измерения проводятся при минимальном уровне фонового излучения (в пределе, для космических радиотелескопов этот уровень определяется микроволновым «реликтовым» фоном). В результате усилий разработчиков шумовая температура гетеродинных приемников в миллиметровом и в значительной части субмиллиметрового диапазона длин волн уже вплотную приблизилась к квантовому пределу, $\sim h\nu/k$. Такие мал шумящие приемники находят применение и в других областях, прежде всего в атмосферных исследованиях.

Размер поля зрения радиотелескопа, как и оптического телескопа, ограничивается аберрациями. Двухзеркальные антенные системы, обычно используемые в миллиметровой и субмиллиметровой астрономии (схемы Кассегрена и Грегори), имеют довольно большой размер поля зрения (например [4]). Естественно, представляется желательным иметь приемники, которые будут регистрировать

информацию во всем этом поле зрения, как матрица ПЗС в оптике, т. е. матричные приемники большой размерности. Однако, далеко не всегда это будет достижимым и оптимальным решением. Во-первых, для точечных источников, исследования которых составляют значительную часть наблюдательных программ, для РСДБ это просто не нужно. Более того, в данном случае это может оказаться вредным, поскольку, как правило, чувствительность отдельного элемента в матричных приемниках оказывается заметно хуже чувствительности одиночного приемника. Во-вторых, создание многоэлементных матричных приемников, особенно гетеродинных, предназначенных для спектральных измерений, — это технически очень сложная и затратная задача. Количество элементов в матричных гетеродинных приемниках, разработанных к настоящему времени, не превышает 2–3 десятков. Оно ограничивается, в частности, доступной мощностью гетеродинов, трудностями организации спектрального анализа в большом числе элементов и пр. В то же время размер матриц болометров растет заметно быстрее и сейчас уже создаются такие матрицы из тысяч элементов. Необходимо также иметь в виду, что существующие матричные приемники не обеспечивают сплошного покрытия поля зрения, чему есть веские физические причины (см., например, [4]).

С учетом вышесказанного легко понять, что к настоящему времени сложился более или менее общий подход к выбору состава приемного комплекса для наземных миллиметровых и субмиллиметровых телескопов. Во-первых, это набор однолучевых гетеродинных (спектральных) приемников, работающих в атмосферных окнах прозрачности. Во-вторых, — матрицы болометров, работающих на предельно высоких для данной антенны частотах (естественно, тоже в окнах прозрачности). Наконец, это гетеродинные матричные приемники. В космических экспериментах нет ограничений, связанных с прозрачностью атмосферы, поэтому там диапазоны частот определяются именно научными задачами данной миссии.

Основным входным элементом гетеродинных приемников коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (до частот ~ 700 ГГц) диапазона являются смесители на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС). Верхняя граница частотного диапазона этих смесителей определяется шириной энергетической щели в ниобии — основном материале используемом в этих приборах. На более высоких частотах наилучшие результаты получаются при использовании в качестве смесителей малоинерци-

онных болометров на эффекте разогрева электронов в сверхпроводнике (Hot Electron Bolometer — НЕВ).

В то же время, как отмечалось выше, в современных приемниках коротковолновой части миллиметрового диапазона (до частот ~ 100 ГГц) все активнее используются входные малошумящие усилители на основе ММІС технологии. В них используются транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT — High Electron Mobility Transistors). Верхняя граница частотного диапазона таких усилителей быстро растет — в 2001 г. появились такие транзисторы на частоты до ~ 115 ГГц, в 2008 г. уже сообщалось о разработке таких приборов на частоты до ~ 360 ГГц [5, 6].

Помимо указанных элементов на сегодня активно пропагандируются приемники близкие классическим болометрам на холодных и горячих электронах, представленным выше, но с определенными особенностями. Эти технологии позволяют реализовывать не только и не столько гетеродинные схемы приема, но и болометрические схемы, в первую очередь пригодные для создания матриц приемников и спектрометров среднего и низкого разрешения, в отличие от гетеродинных структур, позволяющих надежно реализовать спектрометры высокого разрешения.

Появление малошумящих входных усилителей сделало возможным реализацию новых схем построения приемников, имеющих ряд преимуществ перед традиционными схемами. В частности, были разработаны т. н. псевдокорреляционные приемники, успешно применявшиеся, в частности, на космическом аппарате WMAP, исследовавшем мелкомасштабную анизотропию микроволнового «реликтового» фона [7]. Такой приемник представляет собой вариант модуляционного приемника с диаграммной модуляцией при отсутствии подвижных элементов. Это существенно повышает его надежность, что является крайне важным, особенно в космических экспериментах. Входные сигналы с двух рупоров комбинируются и делятся на два канала при помощи двойного волноводного тройника («magic tee»). В каждом из каналов используются малошумящие ВЧ усилители. В одном из каналов осуществляется фазовая модуляция на 180° , а затем сигналы опять комбинируются при помощи другого двойного волноводного тройника. В результате на выходе получается модулированный сигнал, пропорциональный разности входных сигналов с двух рупоров приемника.

В качестве примера рассмотрим 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM) в Испании — пожалуй,

наиболее эффективный инструмент коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Радиотелескоп (рис. 1) расположен на высоте 2920 м в горах Сьерра Невада вблизи вершины Pico Veleta (3394 м) в 50 км от Гранады [8]. Первые измерения проведены в мае 1984 г. С 1985 г. на радиотелескопе ведутся регулярные радиоастрономические наблюдения.



Рис. 1. 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии на Пико Велета (Испания)

В основе конструкции антенны — принцип гомологических деформаций. Среднеквадратичная ошибка поверхности главного зеркала составляет 70 мкм (точность изготовления панелей — 26 мкм). Для уменьшения температурных деформаций используется тепловая изоляция внешней стороны зеркала. Радиотелескоп используется на частотах до 350 ГГц (длина волны 0.8 мм). Коэффициент использования апертуры меняется от 61 ± 3 % на частоте 88 ГГц до 16 ± 4 % на частоте 350 ГГц. Усиление антенны максимально при угле возвышения 43° и уменьшается с отклонением от этого угла, особенно сильно на высоких частотах. Ширина диаграммы направ-

ленности меняется от $28''$ на частоте 86 ГГц до $8''$ на частоте 345 ГГц. Среднеквадратичная точность наведения составляет $2\text{--}3''$, точность слежения при ветре до 15 м/с — $1''$.

В радиотелескопе используется оптическая схема Кассегрена. Диаметр основного зеркала — 30 м, фокусное расстояние — 10.5 м. Вторичное гиперболическое зеркало имеет диаметр 2 м. Эффективное фокусное расстояние кассегреновской системы — 291.9 м. Приемники размещаются в нэсмитовском фокусе антенны. Нэсмитовские зеркала — плоские, размером 1.0×0.7 м. Расстояние от контррефлектора до нэсмитовского фокуса — 19.79 м.

Комплекс приемной аппаратуры включает в себя следующее:

- 4 пары (на две поляризации) однолучевых супергетеродинных СИС приемников, работающих на частотах от 72 до 280 ГГц;
- многолучевой (2×9) СИС приемник HERA, работающий в диапазоне 215—272 ГГц;
- матрицу болометров МАМВО-II диапазона длин волн 1.2 мм (117 элементов).

Приемники могут использоваться в различных комбинациях (до 4-х приемников одновременно), благодаря использованию в оптической схеме частотно-избирательных элементов и поляризационных сеток. Все приемники размещены неподвижно в нэсмитовском фокусе антенны. Недавно этот комплекс приемников был заменен новым 4-х диапазонным (3, 2, 1.3, и 0.9 мм) двухполяризационным приемником EMIR (элементы всех диапазонов размещены в одном криостате). Его оптическая схема также позволяет вести прием четырьмя каналами одновременно. Для спектрального анализа имеется набор фильтровых спектроанализаторов и автокорреляционный спектроанализатор VESPA.

Новые инструменты миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Большой миллиметровый радиотелескоп (LMT) в Мексике

Радиотелескоп расположен на высоте 4 600 м на горе Серро Негра в Мексике [9]. В настоящее время проводится юстировка поверхности антенны. Диаметр основного зеркала — 50 м. Ожидаемая точность поверхности — 75 мкм. Предусмотрена подстройка поверхности с помощью актуаторов. Проведен сеанс измерений поверхности антенны

методом радиоголографии. Ожидаемая точность слежения $\sim 1''$, но какова будет абсолютная точность наведения в условиях перепадов температуры и ветровых нагрузок, неясно.

Радиотелескоп построен по схеме Кассегрена—Нэсмита. Вторичное зеркало имеет диаметр 2.5 м. При помощи системы зеркал принимаемый сигнал направляется в приемную кабину, где будут стационарно располагаться приемники.

Для радиотелескопа на основе новейших технологий разработаны приемники с уникальными на сегодняшний день параметрами. Часть приемников уже изготовлена и в настоящее время либо тестируется, либо используется на других антеннах. Особенно хотелось бы отметить следующие разработки:

1. **SEQUOIA**. Это 32-х элементный (две 4×4 матрицы на 2 поляризации) матричный приемник на основе InP ММІС усилителей диапазона 85—116 ГГц [10], что представляет собой новый шаг в развитии приемной техники данного диапазона. Шумовая температура в каждом канале ~ 60 К. Мгновенная полоса приема (определяемая ПЧ) — 15 ГГц. Это позволит одновременно наблюдать большое число спектральных линий. В настоящее время приемник уже успешно используется на 14-м антенне Обсерватории пяти колледжей.
2. **Приемник «красного смещения»**. Это сверхширокополосный (мгновенная полоса 75—111 ГГц) приемник на основе ММІС технологии, предназначенный для спектральных обзоров и исследования красных смещений субмиллиметровых галактик и других объектов. Имеется 4 пикселя, что обеспечивает двухлучевой прием по двум поляризациям. На выходе, для анализа спектра используется уникальный сверхширокополосный аналоговый автокоррелятор, который полностью покрывает полосу приема (36 ГГц) с разрешением 31 МГц.

АРЕХ и ALMA

Наиболее амбициозный проект современной миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — это Большая Миллиметровая Решетка в Атакаме (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array — ALMA), строительство которой ведется в настоящее время на высоте 5 000 м в пустыне Атакама в Чилийских Андах совместными усилиями ряда организаций США, Европы и Японии. Этот инструмент будет состоять из примерно 60- и 12-м антенн с точностью поверхности

около 20 мкм, что в сочетании с высокой прозрачностью атмосферы в этом районе обеспечивает рабочий диапазон до ~ 900 ГГц.

Рабочий диапазон разбит на 10 поддиапазонов, лишь два первых поддиапазона (до длины волны 3 мм) выполнены по схеме с НЕМТ на входе, остальные построены на основе СИС смесителей. Учитывая значительный масштаб тиражирования приемников, они созданы в унифицированной технологии — идентичных по посадочным габаритам картриджей для всех диапазонов. Картриджи с приемниками монтируются в унифицированные входные модули антенн, построенных на базе криостатов, охлажденных криорефрижераторами замкнутого цикла гелиевого (4 К) уровня температуры. ALMA стала крупнейшим заказчиком и уникальным полигоном по отработке технологии приемников ММ и СубММ волн.

На базе одной из антенн проекта ALMA в этом же районе создан и уже успешно функционирует в течение ряда лет радиотелескоп APEx (Atacama Pathfinder EXperiment) [11] (рис. 2). Как и в большинстве предыдущих примеров, приемная аппаратура размещается в фокусах Нэсмита. Приемники перекрывают широкий диапазон частот, от ~ 200 до $\sim 1\,400$ ГГц. Переключение между приемниками осуществляется при помощи входной квазиоптики, обеспечивающей частотно-независимое облучение главного зеркала [12].

70-м радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа, Узбекистан

Согласно проекту, 70-м радиотелескоп на плато Суффа должен работать на волнах до ~ 1 мм. Его строительство началось более двадцати лет назад, но после распада СССР было заморожено. В настоящее время решается вопрос возобновления строительства радиотелескопа, а также ведутся работы по доработке проекта телескопа с учетом современных технологических возможностей. Он должен стать крупнейшим инструментом коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн в мире с эффективной площадью, сравнимой с суммарной площадью всех антенн интерферометра ALMA.

Аппаратурный комплекс радиотелескопа РТ-70, помимо специализированных аппаратных и программных средств антенной системы, не рассматриваемой здесь, будет состоять из набора основной приемной аппаратуры, представляющей собой линейку различных высокочувствительных приемных устройств, работающих на частотах от ~ 22 до ~ 300 ГГц. Кроме того, в его состав входит обработочный комплекс, способный обеспечивать преобразование, оциф-



Рис. 2. Радиотелескоп АРЕХ

ровку и обработку получаемой с приемных устройств информации, а также набор сервисных и обслуживающих аппаратных комплексов: система мониторинга атмосферного поглощения, система контроля поверхности зеркала (включая приемники для радиоголографии), аппаратный лабораторный комплекс для тестирования и регулировки рабочих приемников, высокоскоростная система передачи данных, криогенное и метрологическое оснащение и так далее. Прогнозируемые параметры аппаратного приемного комплекса РТ-70 на основных диапазонах приведены в таблице. Здесь же указана ожидаемая чувствительность инструмента по яркостной температуре и по плотности потока.

Космические обсерватории Herschel и Planck

Недавно (в мае 2009 г.) одной ракетой Ариан 5 был осуществлен запуск сразу двух космических обсерваторий, разработанных

Европейским космическим агентством, — Herschel и Planck. Аппараты выведены на орбиты в области лагранжевой точки L2 системы Солнце—Земля (на расстоянии 1.5 млн км от Земли в направлении противоположном Солнцу). Обе они предназначены для работы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, но их научные задачи и приборное оснащение существенно различаются.

Herschel, с зеркалом диаметром 3.5 м, представляет собой крупнейший космический телескоп. На его борту установлен набор гетеродинных приемников на частоты от ~ 500 до $\sim 1\,900$ ГГц, а также болометрические фотометры и спектрометры на волны от ~ 60 до ~ 670 мкм. Основные научные задачи — исследования образования звезд и галактик, исследования химического состава атмосфер планет, комет и пр.

Научная задача аппарата Planck — исследования мелкомасштабной анизотропии и поляризации микроволнового реликтового фона. Приборное оснащение включает в себя низкочастотные (от 30 до 70 ГГц) приемники на основе широкополосных НЕМТ усилителей и набор высокочастотных болометрических приемников на частоты от ~ 100 до ~ 850 ГГц.

Проект «Миллиметрон»

Следующим важным шагом в развитии космической радиоастрономии может стать российский проект «Миллиметрон», включенный в федеральную космическую программу до 2016 г. Предполагается запуск телескопа с зеркалом диаметром 12 м, которое только за счет радиационных экранов будет охлаждаться до 50 К (рис. 3). Изучается возможность активного охлаждения зеркала до ~ 4 К. Рабочий диапазон, по крайней мере центральной части зеркала, должен простирается в средний ИК диапазон. Огромный по сравнению с другими космическими телескопами размер зеркала и его охлаждение должны обеспечить беспрецедентную чувствительность по плотности потока, ~ 1 мкЯн при интегрировании в течение одного часа, что на несколько порядков превосходит чувствительность инструментов аппарата Herschel. Предполагается использование Миллиметрона в режиме РСДБ совместно с наземными радиотелескопами.

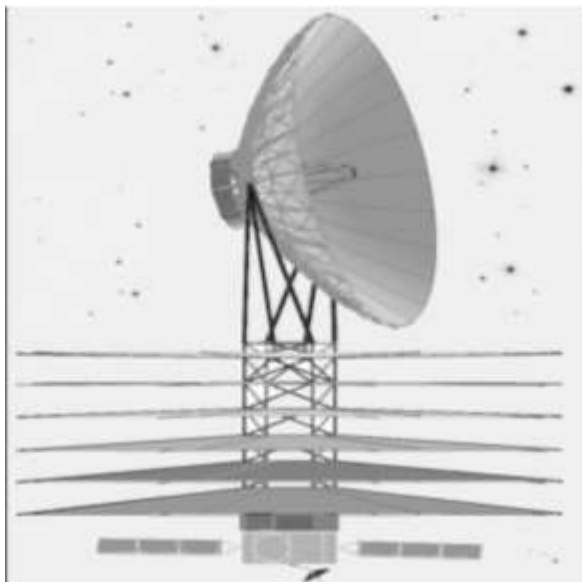


Рис. 3. Предполагается, что так будет выглядеть космическая обсерватория «Миллиметрон». Шесть радиационных экранов обеспечат пассивное охлаждение до ~ 50 K

Заключение

Новые инструменты миллиметровой и субмиллиметровой астрономии должны вывести астрофизические исследования в этом диапазоне на качественно новый уровень. Станет возможным детальное исследование объектов как нашей Галактики, так и соседних галактик, а также изучение различных явлений в ранней Вселенной с недостижимыми ранее чувствительностью и угловым разрешением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-02-00942).

Список литературы

1. Зинченко И. И. Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. — 2003. — Vol. 46, № 8—9. — Р. 641—659.

2. Вдовин В. Ф., Зинченко И. И. Современные радио-астрономические приемные системы миллиметровых и субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. — 2009. — Vol. 52, № 7. — P. 511—524.
3. Carlstrom J. E., Holder G. P., Reese E. D. Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2002. — Vol. 40. — P. 643.
4. Padman R. Optical Fundamentals for Array Feeds // Multi-Feed Systems for Radio Telescopes. Workshop held in Tucson, Arizona, May 16—18, 1994: Astronomical Society of the Pacific. Conference Series. — Vol. 75. — 1995. — P. 3.
5. Mei X. B., Yoshida W., Deal W. R. et al. 35-nm InP HEMT SMMIC Amplifier With 4.4-dB Gain at 308 GHz // IEEE Electron Device Letters. — 2007. — Vol. 28, № 6. — P. 470—472.
6. Samoska L., Deal W. R., Chattopadhyay G. et al. A Submillimeter-Wave HEMT Amplifier Module With Integrated Waveguide Transitions Operating Above 300 GHz // IEEE Trans. MTT. — 2008. — Vol. 56, № 6. — P. 1380—1388.
7. Jarosik N., Bennett C. L., Halpern M. et al. Design, Implementation, and Testing of the Microwave Anisotropy Probe Radiometers // Astrophys. J., Suppl. Ser. — 2003. — Vol. 145. — P. 413—436.
8. Wild W. — The 30m manual: A handbook for the IRAM 30m telescope.
9. Irvine W. M., Schloerb F. P. The Large Millimeter Telescope- El Gran Telescopio Milimetrico // Bull. Am. Astron. Soc. — 2005. — Vol. 37. — P. 652.
10. SEQUOIA. — <http://donald.phast.umass.edu/~fcrao/instrumentation/sequoia/seq.html>.
11. Güsten R., Nyman L.-Å., Schilke P. et al. The Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) — a new submillimeter facility for southern skies // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 454, № 2. — P. L13—L16.
12. Nyström O., Lapkin I., Desmaris V. et al. Optics Design and Verification for the APEX Swedish Heterodyne Facility Instrument (SHEFI) // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2009. — Vol. 30, № 7. — P. 746.

КОМПЛЕКС МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭВОЛЮЦИИ И ДИНАМИКИ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Основной задачей метеорной астрономии является определение происхождения, эволюции, свойств метеорных тел и структуры метеорного комплекса в Солнечной системе. Эта задача может быть решена только на основе результатов наблюдений метеорных явлений в атмосфере Земли, регистраций метеорных тел на космических аппаратах и теоретических разработок, связанных с анализом динамики метеорных частиц и их возможной генетической связи с малыми телами: кометами и астероидами. Очень важным аспектом здесь являются исследования в области физики метеорных явлений в атмосфере Земли. Результаты этих исследований имеют решающее значение при интерпретации результатов наблюдений метеоров.

Совместно с кометами и астероидами, метеороиды составляют популяцию малых тел Солнечной системы. Согласно современным представлениям, родительскими телами метеороидов являются кометы и астероиды. Благодаря малым массам, состав и физико-химические свойства малых тел остались почти такими же, как и при образовании планетной системы. Под действием силы тяжести, внутреннего тепла, вулканической деятельности, ядерных и химических реакций вещество больших тел — Солнца, планет (в том числе Земли и Луны) — со временем сильно изменилось. Популяция же метеорного вещества является остатками того вещества, из которого образовалась Солнечная система.

В последнее время в метеорной астрономии одним из наиболее динамично развивающихся методов является компьютерное моделирование образования и эволюции комплекса малых тел Солнечной системы. Как правило, технология построена по модульному принципу, что позволяет постоянно наращивать ее функции и по необходимости менять алгоритмы исследования в зависимости от поставленных задач. Динамика и эволюция кометы и ее метеороидов рассматривается с учетом гравитационных возмущений от всех

планет, что позволяет анализировать вклад гравитационного потенциала всех планет в целом и отдельных планет в частности. Такие исследования выявляют закономерности эволюции роя на длительном временном интервале, прогнозируют пространственную структуру метеороидного комплекса и вероятное время его существования как компактного образования. Наконец, такая возможность информационных технологий как графическая визуализация результатов в трехмерном пространстве позволяет представить особенности структуры метеороидных новообразований, ориентацию роя относительно орбит других небесных объектов и населенность тех или иных космических областей.

Однако при решении определенных задач метеорной астрономии возникают противоречия между представлениями классической динамики и развитых алгоритмов в приложении к исследованию поведения малых тел в космическом пространстве. В этом случае мы имеем дело с таким явлением как невычислимые процессы: не имеем пока возможности учитывать в моделях все факторы, возможно действующие на образование и эволюцию малого тела. В результате технология моделирования динамики малых тел выполняется в условиях многофакторной неопределенности (неизвестны условия дезинтеграции родительского тела, положение точки выброса вещества на орбите и его направление, дисперсия начальных скоростей выбросов частиц, плотность, форма, масса метеороидов, влияние совокупности негравитационных эффектов). Это приводит к тому, что модели дезинтеграции родительских тел определяют только границы области образования метеорного роя в рамках заданных начальных условий, дают множество вероятностных параметров, которые необходимо идентифицировать с результатами наблюдений.

Точность, полнота информации и статистическая обеспеченность наблюдательных данных в значительной степени зависят от метода наблюдений метеорных явлений. В настоящее время различные диапазоны масс малых тел обеспечены наблюдательными данными в разной степени.

Современная наблюдательная метеорная база данных, доступная для открытого пользования, представлена двумя основными блоками. Один из блоков представлен базой данных визуальных наблюдений метеоров под эгидой Международной метеорной организации ММО (International Meteor Organization, IMO). Начиная с 1987 г., ежегодные каталоги содержат данные наблюдений о численности и звездной величине потоковых и спорадических метеоров [1]. Кроме

того, опубликованные в различных изданиях наблюдения прошлых лет дополняют базу визуальных наблюдений. На сегодня это наиболее статистически обеспеченная наблюдательная метеорная база, позволяющая решать ряд задач (изучение суточной и сезонной вариации численности метеоров, притока метеорного вещества на Землю, поиск и подтверждение теоретических кометных радиантов, выявление новых радиантов, определение степени активности исчезающих потоков). Для решения таких задач как определение структурных характеристик метеорного потока (параметра функции светимости метеоров, момента максимума активности потока, ширины потока, формы профиля и др.) разработаны методики, учитывающие ошибки и селекцию метода наблюдений. Однако при визуальных наблюдениях метеорных явлений не определяются скорости метеороидов, а, следовательно, и их орбиты.

Второй блок наблюдательной метеорной базы данных представлен каталогами метеорных орбит, полученных разными методами наблюдений. Сводный фотографический каталог Центра метеорных данных Международного астрономического союза (IAU MDC, Лундский каталог) версии 2003 г. содержит 4526 метеорных орбит, полученных наблюдателями различных стран за период 1936 — 1989 гг. [2]. Каталог объединяет в себе несколько каталогов, в том числе каталог, составленный Мак-Кроски и Позен, а также орбиты, полученные по наблюдениям в Душанбе, Одессе, Киеве. Самые ранние орбиты получены в Гарварде с помощью малых камер, более поздние данные представлены японскими наблюдателями. Наблюдения метеоров фотографическими камерами типа Супер-Шмидт значительно повысили статистическую обеспеченность однородного материала, что, в свою очередь, компенсировало низкую точность графической обработки фотонегативов.

Каталог IAU содержит как геоцентрические данные траектории пути метеора, так и элементы его орбиты. В каталоге представлены орбиты болидов от -20^m (по данным наблюдений Американской, Канадской и Европейской болидными сетями) и ярких метеоров до $+2^m$. Минимальная регистрируемая масса метеорных тел каталога составляет порядка 10^{-1} — 10^{-2} г. В каталоге не приводятся ошибки наблюдаемых параметров скоростей, что не дает возможности оценить точность полученных результатов при решении задач на основе каталога. Необходимо отметить, что каталог продолжает попол-

няться и перерабатываться. Его последняя версия, которая содержит 4581 орбит за период 1936—1996 гг., была представлена сотрудниками Астрономического института Словацкой академии наук.

В 1997 г. был опубликован фотографический каталог метеорных орбит по данным наблюдений в 1981—1993 гг. фотографической метеорной службы Голландского метеорного общества [3]. Каталог содержит 359 орбит спорадических и потоковых ярких метеоров от -10 до 0^m . Особенностью данного каталога является то, что каждый метеор регистрировался несколькими камерами. Точность определения скорости метеорного тела лежит в пределах 0.2—1.5 км/с, что повышает надежность определения орбит.

В последние два десятилетия появились каталоги метеорных орбит, полученные по телевизионным наблюдениям. Следует отметить три каталога: каталог, полученный в Астрономическом институте Чешской республики за период 1998—2001 гг. (817 орбит) [4], каталог Голландского метеорного общества за период 1991—2002 гг. (1181 орбита) и Японского метеорного общества за период 1983—2007 гг. (3724 орбиты) [1]. Все телевизионные каталоги содержат информацию об ошибках определения скоростей метеорных тел (ошибка не превышает 12 %), кроме того, в двух первых каталогах уже приведены ошибки вычисленных элементов орбит, координаты радианта и их ошибки. Телевизионные каталоги охватывают диапазон масс более мелких метеороидов до 10^{-3} — 10^{-4} г, так как регистрируются метеоры до $+4^m$. Таким образом, сочетание фото- и телевизионных каталогов увеличивает диапазон исследуемых масс метеороидов, что позволяет изучать особенности структуры роя в зависимости от массы частиц.

При внедрении радиолокации в метеорную астрономию многократно увеличилось число регистрируемых метеорных тел и расширился диапазон наблюдаемых звездных величин до $+12$ — $+13^m$. Но при этом также увеличилась сложность учета функции замечаемости метеороидов особенно в зависимости от их скорости. Было обнаружено, что при радиолокационных наблюдениях регистрируется около 30 % всей совокупности метеорных тел в данном диапазоне масс. Причем в зарегистрированной совокупности метеоров практически отсутствуют метеоры со скоростями меньше 20 км/с и очень мало метеоров со скоростями выше 60 км/с. Это обстоятельство, в свою очередь, искажает распределение радиантов спорадических метеорных тел (СМТ), так как изучение распределения плотности радиантов СМТ по небесной сфере без определения скоростей ме-

теоров свидетельствует о наличии в области антиапекса метеоров со скоростями меньше, чем 20 км/с.

Радиолокационные наблюдения дали большой статистический материал о метеорном комплексе в окрестностях орбиты Земли. Прежде всего, необходимо отметить Гарвардский метеорный проект [5], в результате которого в 60–70-х годах прошлого века были получены два каталога, содержащие более 37 тысяч орбит метеорных тел [6, 7]. Результатом радионаблюдений в г. Аделаиде (Австралия) стали два каталога орбит, содержащие более трех тысяч орбит метеоров [8, 9]. Каталоги, содержащие орбиты радиолокационных метеоров, были получены и в Советском Союзе. Это обнинский каталог, содержащий более восьми тысяч орбит [10] и каталог, полученный по результатам наблюдений советской экваториальной экспедиции в г. Могадишо (Сомали) и содержащий более пяти тысяч орбит [11, 12]. Помимо этого, более 5 тысяч орбит слабых метеоров были получены в Харькове [13]. Все радиокаталоги не имеют информации о точности скоростей и элементов орбит и не разделяют метеоры на потоковые и спорадические. В настоящее время радиолокационные наблюдения по метеорной программе постоянно ведутся лишь в Канаде и Новой Зеландии, но результаты этих наблюдений недоступны для независимой обработки специалистам в области метеорной астрономии.

Данные, полученные по радиолокационным наблюдениям, как правило, используются в метеорной астрономии для нахождения распределения метеорных радиантов по небесной сфере, выделения малых и микропотоков, определения их активности и периода действия. Однако наличие большого процента гиперболических орбит в метеорных радиокаталогах свидетельствует, скорее всего, об их низкой точности.

На основе орбит метеорных каталогов решается ряд задач метеорной астрономии. Одной из таких задач является обнаружение малых тел с особыми свойствами орбит. Согласно результатам наблюдений метеорных явлений с поверхности Земли (каталоги орбит метеоров, полученные в Могадишо, Обнинске, Харькове), спорадические метеорные тела движутся по орбитам, кеплеровские элементы которых занимают весь объем в пространстве этих элементов, доступный для метеороидов, пересекающих орбиту Земли. Однако сочетания элементов орбит a и i , в частности, встречающиеся в каталогах радиолокационных метеоров, отсутствуют среди известных в настоящее время комет и астероидов.

Анализ наблюдаемого распределения элементов орбит метеороидов дает возможность прогноза наличия тех или иных классов или групп малых тел, находящихся на определенных орбитах и обладающих определенными физическими свойствами. Так, например, был обнаружен класс объектов, находящихся большую часть времени внутри орбиты Земли (Эксцентриды) [14]. Причем, в этой работе из 50 эксцентрид, найденных в каталогах фотографических метеоров, три имеют наклон больше 90° , из 531 Атонца (на 31 октября 2009 г.) было найдено 202 эксцентрид.

Из анализа каталогов орбит метеоров были найдены распределения радиантов, скоростей и элементов орбит спорадических метеоров, у которых $i > 90^\circ$ и $T_J \geq 0,5767$ [15]. Здесь $T_J = a^{-1} + 2A_J^{-3/2} \sqrt{a(1-e^2)} \cos i$ — постоянная Тиссерана относительно Юпитера, i — угол наклона метеорной орбиты к плоскости эклиптики. В этом соотношении a — большая полуось, e — эксцентриситет орбиты метеорной частицы, A_J — большая полуось орбиты Юпитера. До последнего времени малых тел с таким сочетанием элементов известно не было. И только в 2009 г. был открыт астероид 2009 HC82 с большой полуосью 2.53 а. е. и наклоном 154.4° . Обработка каталогов IAU показала, что число метеорных тел, двигающихся по таким орбитам, растет при переходе к каталогам, содержащим данные о более мелких метеороидах. Характер изменения распределения таких элементов орбит как большая полуось и эксцентриситет с изменением массы регистрируемых частиц вполне укладывается в схему влияния эффекта Пойнтинга—Робертсона. В этой связи можно отметить, что данный эффект не влияет на наклонение орбит, так как зависимость числа орбит от угла наклона имеет практически одинаковый вид для метеоров этой группы во всех каталогах.

В настоящее время не известны эволюционные механизмы, кроме эффектов, связанных с близкими прохождением около планет, радикальным образом меняющие наклон орбит метеорных тел. Поэтому естественно искать родительские тела таких метеороидов среди малых тел, уже двигающихся по орбитам с наклоном больше 90° . Такими представителями малых тел, известными в настоящее время, являются кометы. Скорости выброшенных частиц тем больше, чем меньше массы этих частиц. Очевидно, что чем больше скорости выброшенных частиц, тем больше отклонения орбит этих частиц по отношению к орбите кометы-родоначальницы. А только большие отклонения могут образовать такие орбиты с малыми размерами, как у рассматриваемых метеороидов. Такие метеороиды могут образо-

ваться при дезинтеграции ядер долгопериодических и параболических комет с очень малыми перигелийными расстояниями, например, комет группы Крейтца.

В последние десятилетия пристальное внимание привлекает вопрос о влиянии вековых возмущений на движение малых тел Солнечной системы. Хорошо известно, что большие планеты оказывают вековые возмущения на малые тела при их движении вокруг Солнца. В частности, особо сильные вековые возмущения оказываются на орбиты тел, если частоты изменения орбитальных элементов равны собственным частотам системы планетных орбит. Такой случай называется вековым резонансом. Для определения наличия метеороидов в каталогах оптических наблюдений, подверженных влиянию вековых резонансов, был выбран фотографический каталог Мак-Кроски и Позен. Данный выбор объясняется тем, что этот каталог содержит элементы орбит наиболее крупных метеорных тел, которые в меньшей степени подвержены влиянию негравитационных сил. Для выбора соответствующих метеороидов был использован Д-критерий Саутворта—Хокинса на основе сравнения орбит метеороидов этого каталога с орбитами болидов. Применение критерия заключается в определении расстояния между опорной орбитой (орбитой болида) и орбитой метеороида в пятимерном фазовом пространстве элементов орбиты q, e, i, ω и Ω . Верхнее предельное значение Д-критерия, как принято в большинстве исследований, было принято равным 0.2. В результате было найдено 206 метеороидов, на которые предположительно было оказано влияние вековых резонансов [16].

Исследование структуры метеорных потоков невозможно без привлечения наблюдательных данных. При исследовании активности потока наличие максимумов свидетельствует о возможных выбросах вещества из родительской кометы. На долготе узла орбиты кометы выявляются вторичные максимумы. Смещение максимумов активности относительно орбиты родительской кометы для метеороидов различных масс можно анализировать по статистике регистраций потоковых метеоров. Следующая задача связана с изучением тонкой структуры в поперечном сечении наблюдаемого потока путем выделения струй (филаментов) и ветвей в потоке методами математической статистики по схожести в пределах ошибок элементов орбит, координат радиантов и скоростей. Для каждого из филаментов определяется средняя орбита и исследуется влияние на них гравитационных возмущений от планет, резонансных зон. Распределение метеороидов по массам как функция больших полуосей их орбит дает

информацию о степени влияния на структуру роя негравитационных эффектов (солнечного давления, эффекта Пойнтинга—Робертсона). Однако параметр функции светимости метеоров, как и параметр распределения метеороидов по массам является экспериментальной величиной, определяемой из наблюдений с большой ошибкой.

Для отождествления малых тел Солнечной системы с родительскими телами и отдельных метеоров с метеорными потоками используется ряд критериев (например, критерий Саутворта—Хокинса), основанных на анализе близости в пятимерном фазовом пространстве орбитальных элементов. Первоначальная дисперсия элементов орбит метеороидов сразу после их выброса из родительского тела мала. Поэтому даже при значительных скоростях выброса на данном этапе образования метеороидных роев верхний предел D-критерия не превышает значения 0.07 [17]. В дальнейшем динамическая эволюция орбит метеороидов оказывается хаотичной, причем скорость их рассеивания в пространстве зависит от степени влияния возмущающих эффектов. На основе моделирования гравитационных возмущений от планет на последующую после выброса динамику роя можно исследовать изменение значения D-критерия на временном интервале. Например, для метеорного комплекса Понс—Виннекид, большая полуось средней орбиты которого равна 3 а. е. (родительская комета Понса—Виннеке, группа Юпитера), значение верхнего предела D-критерия уже после пяти оборотов превышает значение 0.5. А для метеорного комплекса Персеид, большая полуось средней орбиты которого равна 26 а. е. (родительская комета Свифта—Туттля, группа Нептуна), значение верхнего предела D-критерия после пяти оборотов не превышает значения 0.11 [17].

Проблема состоит в том, что модельное значение верхнего предела D-критерия для потока, полученное только на основе учета гравитационных возмущений на орбиты метеороидов, не совпадает со значением верхнего предела критерия того же потока, полученным для орбит, опубликованных в метеорных каталогах. Так для потока Персеид, который давно наблюдается и относится к старым потокам, верхний предел D-критерия по каталогам превышает значение 0.4. Причинами расхождений являются, прежде всего, ошибки самих наблюдений, но также и возможное влияние дополнительных негравитационных возмущений. Снижение ошибок наблюдений, повышение точности каталогов метеорных орбит и определение доли влияния ошибок наблюдений в значениях элементов орбит каталогов позволит выявить значимость негравитационных эффектов, степень

их воздействия на эволюцию того или иного метеорного комплекса малых тел и уточнить теорию их учета при моделировании эволюции малых тел.

При наблюдениях метеорных явлений в атмосфере Земли возникает два ограничения, определяющих подмножество метеорных тел, доступных наблюдению с поверхности Земли. Первое ограничение связано с орбитальными характеристиками, определяющими подмножество орбит, пересекающих орбиту Земли. Это ограничение не зависит от метода наблюдения. Второе ограничение связано непосредственно с методом наблюдения метеорных явлений. Это ограничение определяется диапазоном масс метеорных тел, доступным для регистрации тем или другим методом. Еще одной особенностью, присущей только метеорной астрономии, является то обстоятельство, что наблюдения метеорного комплекса осуществляются или с движущейся и притягивающей Земли, или с борта КА. Это обстоятельство искажает информацию о структуре комплекса метеорных тел. Все вышеперечисленное говорит о большой сложности интерпретации результатов наблюдений метеоров, причем интерпретация эта существенно отличается для разных методов наблюдений. Вопрос о распределении метеорных тел в Солнечной системе может быть решен только при наличии полной информации о распределении векторов скоростей метеороидов в широком диапазоне масс для различных гелиоцентрических расстояний.

Список литературы

1. <http://www.imo.net>.
2. *Svoren J., Porubcan V., Neslusan L.* Current Status of the Photographic Meteoroid Orbits Database and a Call for Contributions to a New Version // *Earth, Moon and Planets*. — 2008. — Vol. 102. — P. 11–14.
3. *Betlem H., Ter Kuile C. R., de Lignie M. et al.* Precision meteor orbits obtained by the Dutch Meteor Society — Photographic Meteor Survey (1981–1993) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 128. — P. 179–185.
4. *Koten P., Spurný P., Borovička J., Stork R.* Catalogue of video meteor orbits. Part 1 // *Publ. Astron. Inst. Czech. Acad. Sci.* — 2003. — Vol. 91. — P. 1–32.

5. *Hawkins G. S.* The Harvard radio meteor project // Smithsonian Contributions to Astrophysics. — 1963. — Vol. 7. — P. 53–62.
6. *Southworth R. B., Sekanina Z.* Physical and dynamical studies of meteors. — NASA CR-2316. — 1973.
7. *Sekanina Z., Southworth R. B.* Physical and dynamical studies of meteors. Meteor-fragmentation and stream-distribution studies. — NASA CR-2616. — 1975.
8. *Olsson-Steel D.* Asteroid 5025 P-L, Comet 1967 II Rudnicki, and the Taurid meteoroid complex // Observatory. — 1987. — Vol. 107. — P. 157–160.
9. *Olsson-Steel D.* Identification of meteoroid streams from Apollo asteroids in the Adelaide Radar Orbit surveys // Icarus. — 1988. — Vol. 75, iss. 1. — P. 64–96.
10. *Лебединец В. Н., Корпусов В. Н., Манохина А. В.* Радиолокационные наблюдения в Обнинске. Материалы мирового центра данных Б. — М.: Межведомственный геофизический ком-т при Президиуме АН СССР, 1982.
11. Орбиты метеоров по наблюдениям на экваторе. Там же. — 1975.
12. Орбиты метеоров по наблюдениям на экваторе. Там же. — 1977.
13. *Кащеев Б. Л., Ткачук А. А.* Результаты радиолокационных метеоров слабых метеоров. Каталог орбит метеоров до $+12^m$. Там же. — 1980.
14. *Симоненко А. Н., Терентьева А. К., Галибина И. В.* Метеороиды внутри орбиты Земли — Система Эксцентрид // Астрон. вест. — 1986. — Т. 20, вып. 1. — С. 61–75.
15. *Andreev V. V.* About distribution and origin of the peculiar group of sporadic meteors // Asteroids, Comets, Meteors 1991 / Ed. by A. W. Harris, E. Bowell. — 1992. — P. 5–8.
16. *Андреев В. В.* Оптические метеоры и вековые резонансы // Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты / Ред. Ю. А. Нефедьев, М. Г. Ишмухаметова, Е. С. Баканас: Труды международной конференции. — Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. — С. 112–113.
17. *Ишмухаметова М. Г., Кондратьева Е. Д., Усанин В. С.* Анализ верхнего предела D-критерия Саутворта–Хокинса для метеороидных потоков Понс-Виннекид и Персеид // Астрон. вест. — 2009. — Т. 43, вып. 5. — С. 453–458.

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ И СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрен ряд процессов, приводящих к увеличению плотности темной материи в Солнечной системе, приведены основные характеристики возникающих гало темной материи (размеры, плотности). Также обсуждаются известные на сегодняшний день аномальные эффекты в Солнечной системе (аномалия «Пионеров», «flyby» аномалия и увеличение астрономической единицы).

Some mechanisms of dark matter density enhancement in the Solar system are considered. The main characteristics of the appearing dark matter halos are discussed. Also, the unexplained phenomena within Solar system (the Pioneer anomaly, the flyby anomaly and increase of Astronomical Unit) are considered.

Темная материя во Вселенной

Одна из наиболее важных современных проблем естествознания — это объяснение природы так называемой темной материи, содержание которой в несколько раз превышает обилие обычного вещества во Вселенной. Поиски и исследования в этом направлении в настоящее время ведутся во всех областях современной физики. Одним из наиболее перспективных направлений исследований является поиск темной материи по ее гравитационному проявлению, так как многочисленные эксперименты по ее прямому детектированию напрямую зависят от до сих пор не подтвержденных наблюдениями свойств частиц темной материи. По современным представлениям только $\sim 5\%$ состава Вселенной — это обычное барионное вещество, из которого состоит наше Солнце, Земля и мы сами, $\sim 25\%$ приходится на темную материю и $\sim 75\%$ на наиболее загадочную компоненту — темную энергию. Все наши знания о свойствах темной материи на сегодняшний день базируются лишь на ее гравитационных проявлениях.

Существует целый ряд наблюдаемых эффектов, для объяснения которых предполагается существование нового вида частиц, слабо взаимодействующих с нашей обычной материей:

1. Кривые вращения спиральных галактик (скорость вращения не уменьшается за границей видимого вещества галактики);
2. Вириальные теоремы для кластеров галактик (скорости галактик в скоплениях больше, чем следует из рассмотрения только барионного вещества);
3. Наблюдения гравитационного линзирования (восстановленное распределение массы не соответствует распределению обычного вещества);
4. Образование крупномасштабной структуры Вселенной;
5. Наблюдения анизотропии реликтового излучения.

С другой стороны современная физика элементарных частиц предсказывает существование целого ряда новых частиц, свойства которых полностью соответствуют указанным требованиям. На сегодня существует целый ряд возможных кандидатов на роль частиц темной материи: WIMP (weakly interacting massive particle), нейтрино, аксионы, гравитино, монополи, зеркальная материя, первичные черные дыры и другие кандидаты. Одной из наиболее популярных на сегодняшний день моделей является существование легчайшей суперсимметричной частицы — нейтрино, тем не менее возможны и другие кандидаты, хотя для некоторых из них и требуется наличие тонкой подгонки свойств, чтобы описать наблюдательные данные.

Главное, что мы знаем на сегодняшний день о темной материи — это ее бесстолкновительность, то есть ее сечения негравитационного взаимодействия с обычным веществом малы. Это означает сложность проведения экспериментов по прямому детектированию и в настоящее время твердо установлены лишь верхние границы, хотя некоторые коллаборации и сообщают о возможном детектировании [1, 2].

Одним из возможных свойств частиц темной материи могла бы быть возможность самоаннигиляции, в случае если частица тождественна античастице. В этом случае появляется новый важный канал информации о темной материи во Вселенной. Так как интенсивность аннигиляции $\sim \rho^2$, то это позволяет ограничить сингулярные распределения плотности темной материи в центрах галактик по

наблюдениям верхних ограничений на продукты аннигиляции. Также возможно тестирование околопланетных гало темной материи по вкладу от процесса аннигиляции в тепловой баланс планет [3, 4].

Так как темная материя доминирует в среднем над обычной во Вселенной, то на ранних стадиях эволюции Вселенной гравитационный потенциал нашей Галактики определялся темной материей. Однако обычное вещество за счет столкновительных процессов накапливалось вблизи минимума гравитационного потенциала и в настоящее время доминирует вблизи дна гравитационной ямы нашей Галактики. В процессе своего падения в гравитационном потенциале обычное вещество увлекает за собой и темную материю, что приводит к дополнительному сжатию гало темной материи вокруг нашей Галактики. Этот процесс называется барионным сжатием. Плотность темной материи в окрестности Солнечной системы в результате развития гравитационной неустойчивости во Вселенной и последующего барионного сжатия равна

$$\rho_{D.M.} \sim \rho_{star\ halo} \approx 10^{-2} \frac{M_{\odot}}{pc^3} = 10^{-24} \text{ г см}^{-3} = 0.3 \text{ ГэВ см}^{-3}$$

и оказывается порядка плотности обычного вещества. Указанное значение в 10^6 раз больше среднего значения плотности темной материи во Вселенной. Ближе к центру нашей Галактики доминирует обычное вещество, на периферии темная материя. Многочастичные столкновения частиц темной материи в гравитационном потенциале Галактики приводят к достаточно быстрому установлению Максвелловского распределения по скоростям с дисперсией ~ 220 км/с и средней скоростью частиц темной материи ~ 300 км/с.

Темная материя в Солнечной системе

Существует ряд процессов, приводящих к локальному увеличению плотности частиц темной материи в Солнечной системе. В результате данных процессов образуются области локального увеличения плотности темной материи — образуются гало вокруг Солнца, планет и их спутников.

1. Барионное сжатие на этапе образования Солнечной системы. Данный механизм связан с образованием структур темной материи во время формирования Солнечной системы. Он аналогичен хорошо известному эффекту барионного сжатия во время образования крупномасштабной структуры Вселенной. Так

как время свободного пролета частицы темной материи через Солнечную систему $\sim 1\,000$ лет существенно меньше типичного времени эволюции Солнечной системы $\sim 10^9$ лет, то влиянием этого эффекта можно пренебречь.

2. Гравитационно-столкновительный захват. В этом случае частицы теряют кинетическую энергию при непосредственном прохождении через космические тела за счет прямого взаимодействия с материей. Таким образом, в случае эффективного торможения частиц возможен переход на связанные орбиты даже в случае двухчастичных столкновений. В дальнейшем захваченная частица делает несколько оборотов вокруг космического тела и в конце концов поглощается им. При этих процессах формируется гало частиц повышенной плотности вокруг космического тела. Размеры, плотности возникающего гало существенно образом зависят от массы и взаимодействий рассматриваемых частиц. Например, для частиц темной материи с электрическим и магнитным зарядом, гало вокруг Солнца образуется только для масс $\sim 10^{16}$ ГэВ. Размер гало порядка нескольких солнечных радиусов. Плотность темной материи увеличивается в несколько раз. В 1999 г. Damour, Krauss [5] рассмотрели механизм, при котором частица может не поглощаться Солнцем после нескольких пролетов и таким образом возможен большой накопительный эффект по времени для образования гало. Избежать поглощения позволяет рассмотрение частиц, которые тормозятся, проходя по краю Солнца, а в дальнейшем, из-за эволюции орбиты благодаря взаимодействию с планетами, их траектории не пересекают Солнца. В результате образуется новая популяция частиц на орбите Юпитера, плотность темной материи увеличивается в несколько раз.
3. Гравитационный механизм, который действует независимо от прямого взаимодействия с материей. Чисто гравитационный захват космическими телами, то есть переход частиц на связанные орбиты, возможен только в многочастичных столкновениях. Наиболее важный пример в Солнечной системе — это взаимодействие частиц с парой Солнце—Юпитер. В данном случае образуется новая популяция темной материи на орбите Юпитера. Однако эффективность захвата очень низка, так как скорость вращения Юпитера ~ 13 км/с существенно меньше скорости частиц темной материи ~ 300 км/с, а также обратный процесс рассеяния оказывается очень существенен.

4. Бесстолкновительная фокусировка частиц в гравитационном поле Солнечной системы. Этот эффект связан с бесстолкновительной фокусировкой частиц в произвольном гравитационном поле. Величина эффекта существенным образом зависит от соотношения между скоростями частиц темной материи и скоростью гравитирующего тела. В случае если скорость тела не существенно больше, вокруг него образуется гало темной материи с профилем плотности:

$$\rho \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

На поверхности Солнца коэффициент усиления плотности оказывается ~ 2 . Так как частицы темной материи бесстолкновительные, то мы можем также рассмотреть процесс образования гало также и внутри Солнца. В этом случае коэффициент усиления в центре ~ 5 . Указанный механизм также формирует гало темной материи вокруг белых карликов и нейтронных звезд. Плотность возрастает на поверхности белого карлика в ~ 20 раз, на поверхности нейтронной звезды — в ~ 600 раз.

Однако наиболее физически интересный случай возникает, если скорость гравитирующего тела существенно больше скоростей частиц темной материи. В этом случае возникает двумерная каустическая особенность. Распределение плотности вблизи каустики описывается формулой [6]:

$$\rho \sim \frac{\sqrt{z}}{a}$$

где z — расстояние от гравитирующего тела, a — цилиндрический радиус от линии каустики. В данном случае резко возрастает интенсивность аннигиляционных процессов, так как:

$$W \sim \int \rho^2 dV \sim \int a^{-2} a da \sim \ln a$$

Однако, как правило гравитирующее тело и частицы темной материи имеют общую гравитационную историю, движутся в общем гравитационном потенциале и имеют сравнимые скорости. Таким образом, для возникновения каустики необходим толчок скорости негравитационной природы. Одним из хорошо известных примеров являются вспышки сверхновых. В результате образуются нейтронные звезды со скоростями вплоть до 1000 км/с. Вторым примером

являются теоретически предсказываемая популяция черных дыр, возникающая при слиянии двух черных дыр при определенных кинематических условиях, со скоростями вплоть до 10 000 км/с. Одним из возможных проявлений такой черной дыры могло бы быть наблюдение продуктов аннигиляции в каустике.

Данный механизм был детально рассмотрен для системы Солнце—Земля [6, 7], так как возможная модуляция «зима—лето», могла бы существенно помочь в выделении полезного сигнала при прямом детектировании темной материи. Величина эффекта составляет $\sim 10\%$. Так как в данном случае эффект связан только с гравитационным взаимодействием, то данное явление также должно возникать при движении гравитирующего тела относительно газа любых частиц. И действительно, по наблюдению данного эффекта, была измерена скорость движения Солнца относительно межзвездной среды [8].

Аномальные эффекты в Солнечной системе

В настоящее время существует ряд аномальных эффектов в Солнечной системе, которые могут рассматриваться как проявление неизвестных популяций гравитационных тел в Солнечной системе и требуют детального анализа всех теоретически возможных сценариев, в том числе возможный вклад от ожидаемых популяций темной материи [9].

1. Аномалия «Пионеров»: Наблюдаемое аномальное ускорение аппаратов Пионер 10 и 11 [10]:

$$a = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10} \text{ м с}^{-2}$$

В свое время для объяснения было выдвинуто огромное количество гипотез, начиная от внутренних причин до космологических [10, 11]. Однако в последнее время был выполнен детальный расчет остывания аппаратов и асимметрии теплового излучения [12, 13]. Было показано, что для различных моделей до 67 % аномального ускорения возникает благодаря асимметрии теплового излучения.

2. «Flyby» аномалия [14]: Аномальное изменение энергии 6 космических аппаратов при облете Земли. Указанное изменение не удается объяснить никакими традиционными эффектами. Предпринимались попытки привлечь для объяснения темную

материю [15], однако для этого требуется очень специфичное гало темной материи вокруг Земли с коэффициентом усиления $\sim 10^{17}$.

3. Увеличение Астрономической Единицы [16]. В работе [17] принята попытка объяснить эффект за счет приливного взаимодействия в системе Солнце—Земля, однако количественно описать явление не удалось.

Одним из важных каналов информации о темной материи в Солнечной системе являются высокоточные наблюдения за движением планет. Исходя из этих данных, на сегодня получены верхние пределы на плотность темной материи на орбитах планет [18, 19]. Соответствующие значения:

$$\rho_{limit} \sim 10^{-17} - 10^{-19} \text{ г см}^{-3}$$

Современные модели Солнца также позволяют получить достаточно жесткие ограничения на обилие частиц темной материи внутри Солнца [20].

Заключение

Несмотря на то, что до сих пор нет прямого детектирования темной материи, на сегодняшний день мы много знаем о ее свойствах и распределении во Вселенной. Любая современная модель темной материи должна удовлетворять целому ряду контрольных тестов. Теоретически предсказывается несколько механизмов локального увеличения плотности частиц темной материи в Солнечной системе. Коэффициент усиления порядка нескольких единиц. Это безусловно важно для регистрации сигналов в детекторах частиц темной материи, но пока недостаточно для прямого детектирования темной материи по ее гравитационному проявлению.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ офи-м 09-02-12163.

Список литературы

1. *Bernabei R., Belli P., Cappella F. et al.* First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI // European Physical Journal C. — 2008. — P. 167—+. 0804.2741.

2. *The CDMS Collaboration, Ahmed Z.* Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment // ArXiv e-prints. — 2009. 0912.3592.
3. *Abbas S., Abbas A.* Volcanogenic Dark Matter and Mass Extinctions (<http://xxx.itep.ru/abs/astro-ph/9612214>). — 1996.
4. *Mark G. D., Beacom J. F., Bertone G.* Towards closing the window on strongly interacting dark matter: Far-reaching constraints from Earth's heat flow // Phys. Rev. D. — 2007. — Vol. 76. — P. 043523.
5. *Damour T., Krauss L. M.* New WIMP population in the solar system and new signals for dark matter detectors // Phys. Rev. D. — 1999. — Vol. 59. — P. 063509.
6. *Sikivie P., Wick S.* Solar wakes of dark matter flows // Phys. Rev. D. — 2002. — Vol. 66. — P. 023504.
7. *Ling F. S., Sikivie P., Wick S.* Diurnal and Annual Modulation of Cold Dark Matter Signal (<http://xxx.itep.ru/abs/astro-ph/0405231>). — 2004.
8. *Курт В. Г., Миронова Е. Н., Берто Ж. Л., Далодье Ф.* Атомы гелия в межзвездной и межпланетной среде // Космич. исслед. — 1984. — Т. XXII, вып. 2. — С. 225.
9. *Zammerzahl C., Preuss O., Dittus H.* Is the physics within the Solar system really understood? (<http://ru.arxiv.org/abs/gr-qc/0604052>). — 2006.
10. *Anderson J. D., Laing P. A., Lau E. L., et.al.* Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11 // Phys. Rev. D. — 2002. — Vol. 65. — P. 082004.
11. *de Diego J. A., Nunez D., Zavala J.* Pioneer anomaly? Gravitational pull due to the Kuiper belt (<http://xxx.itep.ru/abs/astro-ph/0503368>). — 2005.
12. *Toth V. T., Turyshev S. G.* Thermal recoil force, telemetry, and the Pioneer anomaly (<http://ru.arxiv.org/abs/0901.4597>). — 2009.
13. *Bertolami O., Francisco F., Gil P. J. S., Paramos J.* Thermal Analysis of the Pioneer Anomaly: A method to estimate radiative mtransfer (<http://ru.arxiv.org/abs/0807.0041>). — 2008.
14. *Anderson J. D., Campbell J. K., Ekelund J. E., et.al.* Anomalous Orbital-Energy Changes Observed during Spacecraft Flybys of Earth // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 100. — P. 091102.

15. *Adler S. L.* Can the flyby anomaly be attributed to earth-bound dark matter? (<http://ru.arxiv.org/abs/0805.2895>). — 2008.
16. *Krasinsky G. A., Brumberg V. A.* Secular increase of astronomical unit from analysis of the major planet motions, and its interpretation // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2004. — Vol. 90. — P. 267.
17. *Muira T., Arakida H., Kasai M., Kuramata S.* Secular increase of the Astronomical Unit: a possible explanation in terms of the total angular momentum conservation law (<http://ru.arxiv.org/abs/0905.3008>). — 2008.
18. *Khrilovich I. B.* Density of dark matter in Solar system and perihelion precession of planets (<http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0702260>). — 2007.
19. *Frere J. M., Ling F. S., Vertongen G.* Bound on the dark matter density in the Solar System from planetary motions // *Phys. Rev. D.* — 2008. — Vol. 77. — P. 083005.
20. *Kardashev N. S., Tutukov A. V., Fedorova A. V.* Limits on the Mass of Dark Matter in the Sun from a Model for the Modern Sun and Its Previous Evolution // *Astronomy Reports.* — 2005. — Vol. 49, iss. 2. — P. 134.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВСЕЛЕННОЙ**

Благодаря существенному уточнению лабораторных частот и параметров сверхтонкого расщепления межзвездных молекул, выросшей чувствительности приемников и частотному разрешению цифровых анализаторов спектра, современные радиоастрономические измерения позволяют определять турбулентность и градиенты систематических движений в областях звездообразования с точностью ~ 1 м/с. Приведены примеры детальных исследований темных облаков, связанных с областями формирования звезд солнечного типа, основанных на наблюдениях большого количества разнообразных молекул. Из сравнений частот радиолиний молекул, измеренных с рекордной точностью на Земле и в космосе, получены оценки возможных вариаций отношения массы электрона к массе протона в зависимости от локальной барионной плотности, которые на несколько порядков точнее аналогичных оценок, полученных для квазаров в оптике. Показано, как детальный анализ спектров, измеренных с высокой точностью, позволяет сделать далеко идущие выводы относительно физических свойств нашей Вселенной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-02-12223) и Программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» (раздел IV.12/2.5).

ГЕОМЕТРИЯ И ТОПОЛОГИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Фридрих Штовассер (1928—2000), австрийский архитектор и живописец, создатель оригинальных зданий в «биоморфном» стиле и более известный под именем Фриденсрайх Хундертвассер люто ненавидел прямую линию, полагая, что именно она является причиной всех наших бед: «В 1953 г. я понял, что прямая линия ведет человечество к упадку. Тирания прямой стала абсолютной. Прямая линия — это нечто трусливое, прочерченное по линейке, без эмоций и размышлений; это линия, не существующая в природе. И на этом насквозь прогнившем фундаменте построена наша обреченная цивилизация».

В 1983 г. Бенуа Мандельброт попытался спасти ситуацию, заметив, что: «Облака — это не сферы, горы — это не конусы, линии берега — это не окружности, и кора не является гладкой, и молния не распространяется по прямой. . . » Собственно с его пионерских работ и возникла новая наука — Фрактальная Геометрия. По своей сути, она противоречила точке зрения Галилея, который за 350 лет до Мандельброта утверждал, что буквами Книги Природы являются треугольники, окружности и другие евклидовы фигуры.

Сперва геометрия фрактальных множеств воспринималась многими как Апокрифическое Евангелие — вещь, на которую, из любопытства, стоит конечно взглянуть, не боясь быть застигнутым за чем-то постыдным. Хорошим тоном считалось поговорить о ней, и, быть может, даже самому прочесть несколько страниц и посмотреть удивительно красивые картинки. Но вот поверить в нее — это, конечно, Ересь.

Со временем, ситуация изменилась настолько, что начался Крестовый Поход во имя Дробных Размерностей. Трудно было даже найти данные, которые не проверялись бы, по меньшей мере, на предмет оценки показателей Херста или бокс-размерностей. Умные скептики стояли в стороне дожидаясь получения вожаемой дробной «цифири», а затем вопрошали, с изрядной долей сарказма: «Ну и какова же в итоге исподняя (т. е. физическая) сущность всех этих дробей?» Новые термины, такие как «красный» или «коричневый»

шум, «антиперсистентность» или «бокс-размерность» обычно не наполнялись физическим содержанием — *sapienti sat!*

Та же ситуация повторилась, но несколько позднее, с мультифрактальным формализмом. Для физиков-экспериментаторов, мультифрактальные спектры казались, поначалу чем-то непостижимо сложным. Затем, когда их научились считать, наступило даже некоторое разочарование. Как и в случае фракталов, оказалось что чрезвычайно трудно указать данные, для которых нельзя было бы получить что то напоминающее параболу. И опять тот же вопрос: «Ну и что?» Что физически означают эти показатели сингулярности, особенно в ситуации, далекой от канонического контекста полностью развитой турбулентности?

Разумеется можно спрятаться за математические термины. Однако Геометрическая теория меры, Пространства Геделя, Бесова или Соболева, слабо дифференцируемые функции — все это вещи, довольно далекие от традиционных университетских курсов анализа для физиков.

Хорошо бы разобраться в этих сингулярных колючках на чем-то простом и понятном. Но оперируя при этом почти настоящими математическими объектами, а не их упрощенными, иногда до бесстыдства, суррогатами. И хорошо было бы показать «как это все играет» на вещах, простых но полезных для практического употребления. Настоящая Лекция как раз и является попыткой сделать это.

Я выбрал, для этого своего весьма рискованного предприятия, цифровые изображения. Они и будут служить нам объектом для мультифрактальных манипуляций. В самом деле, наиболее популярная теперь форма экспериментальных данных — это изображения, а не скалярные временные ряды. Ну а в качестве инструмента был выбран Микроканонический мультифрактальный формализм. Он менее известен физикам, но гораздо богаче набором нужных понятий, нежели традиционный канонический формализм. Я буду следовать давно установившейся традиции, используя компромиссный стиль между лекцией и конспектом из различных источников. Лекция не ограничивает свободу передвижения по проблеме, а использование мудрости источников оправдывает Первый закон Скотта: «Оригинальность — это хорошо, зато плагиат быстрее».

Я искренне благодарен своим коллегам из Института математики (Алма-Ата) Л. Каримовой, О. Круглун, С. Мухамеджановой и своей аспирантке И. Князевой, за компьютерные эксперименты, приведенные в работе и дружеское сочувствие.

ЗВЕЗДЫ С ДЕФИЦИТОМ МЕТАЛЛОВ О НУКЛЕОСИНТЕЗЕ В ГАЛАКТИКЕ

Сферическая составляющая (гало) нашей Галактики населена старыми маломассивными звездами с возрастом более 12 млрд лет, и они являются свидетелями ее ранней истории. По современным представлениям, Галактика сформировалась из первичного вещества, синтезированного при Большом Взрыве, и первое поколение звезд состояло из водорода и гелия с очень незначительной примесью лития, бериллия и бора. Эти гипотетические звезды относятся к звездам III типа населения. Нумерация типов населений ведется в направлении от молодых к старым; звезды дисковой составляющей — самое молодое население Галактики относятся к I типу населения. Теория предсказывает, что звезды III типа населения были массивными — с массой в 40–300 раз больше массы Солнца и, следовательно, с коротким временем жизни — менее 5 млн лет. Их эволюция завершалась либо взрывом сверхновой II типа очень высокой светимости (гиперновой), либо формированием черной дыры. В процессе ядерной эволюции массивной звезды и в последующем взрыве сверхновой синтезируются практически все химические элементы, начиная с углерода и более тяжелые. В астрохимии их принято называть металлами. Появление в галактическом веществе углерода, кислорода и других тяжелых атомов, выброшенных при первых взрывах сверхновых звезд в Галактике, повлияло на условия образования звезд, и новые поколения звезд формировались уже в широком диапазоне масс и с ненулевым содержанием металлов. Эти звезды относят ко II типу населения. Те из них, которые родились с массой меньше солнечной, все еще не завершили свою эволюцию, и мы можем наблюдать их в современную эпоху и изучать с их помощью ранние этапы эволюции Галактики. Массивные звезды II типа населения уже давно прекратили свое существование, но сыграли свою роль в обогащении межзвездной среды металлами, так что металличность каждого следующего поколения звезд росла. К началу эпохи формирования звездного населения диска содержание металлов в галактическом веществе было всего лишь в 2–3 раза меньше солнечного.

Такая картина химической эволюции Галактики была построена на основе изучения звезд с дефицитом металлов, но она еще далека от завершения. Действительно ли звезды III типа населения все были массивными и каков диапазон масс, в котором формировалось первое поколение звезд в Галактике? В наблюдениях звезды с нулевой металличностью не обнаружены. Потому что их нет? Или пока не обнаружены? В гало звездная плотность в 1000 раз меньше, чем в диске, и расширение объема поиска звезд с большим дефицитом металлов или с полным отсутствием металлов — это сложная наблюдательная задача. К настоящему времени уже обнаружены три звезды с содержанием железа (которое служит индикатором общего содержания металлов) в 50 000 раз меньше солнечного. Химический состав этих и других звезд с большим дефицитом металлов дает информацию о выходе элементов в ранних эпизодах нуклеосинтеза. А это позволяет судить о массах звезд III типа населения, несмотря на то, что мы их не видим.

Наблюдения показывают, что с уменьшением содержания металлов растет доля звезд с необычным химическим составом. Например, среди звезд с содержанием железа в 1000 раз меньше солнечного ($[Fe/H] \simeq -3$) обнаружены звезды с большим относительным избытком элементов, находящихся в Периодической таблице Менделеева за группой железа. Химический состав каждой такой звезды, вероятно, отражает выход элементов в отдельном эпизоде нуклеосинтеза. По современным представлениям, элементы с $Z > 26$ синтезируются в реакциях нейтронных захватов. В ранней Галактике доминирующим должен был быть быстрый процесс (r-процесс) нейтронных захватов. До сих пор нет единого мнения об астрофизическом месте r-процесса. Разрабатываются несколько гипотез. В одной из них r-процесс протекает при взрыве сверхновой II типа. Но удовлетворительной модели взрыва сверхновой II типа пока нет. Поэтому и задача расчета выхода элементов в r-процессе не решена. В этой ситуации обнаружение и изучение звезд, обогащенных элементами r-процесса, очень важно для понимания физики r-процесса и места его протекания.

А. В. Миронов, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

МНОГОЦВЕТНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

Кратко рассмотрена история многоцветных фотометрических систем и их современное состояние. Показаны возможности современных фотометрических систем по определению спектральных типов звезд (классификация), количественных значений физических параметров звезд (квантификация) и величин межзвездной экстинкции.

The history and modern condition of multicolor photometric systems are briefly considered. Capabilities of photometric systems for classification (determination of stellar spectral types), quantification (determinations of stellar physical parameters) and interstellar extinction measurements are shown.

Введение

Основными физическими характеристиками звезды являются ее светимость L , масса M , радиус R и эффективная температура T_e . Связь между этими величинами (выраженных в солнечных единицах) задается известной формулой

$$\lg L/L_{\odot} = 2 \lg R/R_{\odot} + 4 \lg T_e/T_{e\odot}, \quad (1)$$

следующей из закона Стефана—Больцмана. Именно с этой формулы начинается изложение вопросов многоцветной астрофотометрии в монографии Витаутаса Страйжиса «Многоцветная фотометрия звезд» [1, глава 1, §1.1]. Отметим, что многие сведения, приведенные во введении и четырех первых разделах настоящей лекции, основаны на материалах этой знаменитой книги.

Учитывая выражение для ускорения силы тяжести на поверхности звезды

$$g = GM/R^2, \quad (2)$$

получаем формулу связи основных физических параметров звезд

$$\lg L/L_{\odot} = \lg M/M_{\odot} - \lg g/g_{\odot} + 4 \lg T_e/T_{e\odot}. \quad (3)$$

В процессе равновесной эволюции звезды в каждый момент должны выполняться условия формулы (3), определяющая положение звезды на так называемой теоретической диаграмме Герцшпрунга—Рессела $\lg L/L_{\odot}, \lg T_e$.

Однако положение звезды на диаграмме HR зависит еще и от начального химического состава, выражаемого относительным содержанием водорода X , гелия Y и всех более тяжелых элементов Z . Звезды имеющие одинаковую массу, но отличающиеся по химическому составу, имеют разные радиусы, а, следовательно, различные $\lg g$.

Определение перечисленных физических свойств поверхностных слоев звезд является одной из основных задач астрофизики. Это трудная задача из-за многочисленности типов звезд. Кроме того, дополнительные трудности вносит наличие межзвездной экстинкции, искажающей распределение энергии в спектре звезд и вносящих дополнительное неизвестное.

В принципе, если получить высокоточный и высокодисперсный спектр звезды, то можно определить все основные параметры, включая межзвездную экстинкцию, но такие измерения либо требуют дорогостоящего времени очень больших телескопов, либо заставляют ограничиваться лишь наиболее яркими объектами. Поэтому астрофизика вынуждена использовать методы многоцветной фотометрии звезд. Завершим наше введение цитатой из книги Страйжиса [1, глава 5].

«Информация о температурах, ускорениях силы тяжести, химических составах, эволюционных стадиях и других физических свойствах звезд, а также об их межзвездном покраснении может быть получена или с помощью анализа спектров звезд, или путем фотометрии их света в определенных интервалах длин волн. Набор участков спектра, описываемых определенными кривыми реакции, в которых проводится измерение интенсивности излучения небесного объекта с какой-то конкретной целью, носит название фотометрической системы. Фотометрическая система может содержать от одной до нескольких десятков полос.»

Эпоха до UBV

Применение в астрономии фотографического метода наблюдений с использованием несенсибилизированных фотопластинок привело к появлению в начале XX в. первых двухцветных фотометрических систем. Фотографические величины m_{pg} в сочетании с визуальными m_v или фотовизуальными m_{pv} составили двухцветную систему, в которой можно было получить один показатель цвета (колор-индекс). Дальнейшие работы в Гарвардской и Маунт-Вильсоновской обсерваториях привели к созданию Северного Полярного Ряда (NPS) — фотометрического стандарта вокруг северного полюса мира, содержащего около 100 звезд от 2 до 20 звездной величины. Фотографические (IPg) и фотовизуальные (IPv) величины этих звезд были утверждены на I-м съезде Международного Астрономического Союза в 1922 г. и составили первичный стандарт интернациональной системы величин IPg, IPv .

Положение кривых реакции интернациональной системы было выбрано не по каким-либо соображениям, связанным с физикой звезд, а почти случайно. Полоса IPv приблизительно соответствует кривой чувствительности человеческого глаза, а положение полосы IPg определилось как сочетание спектральной чувствительности несенсибилизированных фотопластинок со спектральной кривой пропускания оптики 60-дюймового Маунт-Вильсоновского рефлектора, в систему которого было переведено большинство наблюдений.

В разных обсерваториях для определения инструментальных величин звезд NPS применялись самые различные рефракторы и рефлекторы, что приводило к тому, что в кривую реакции величин m_{pg} попадало различное количество ультрафиолетового излучения. Следствием этого оказались сложные и нелинейные связи между величинами m_{pg} у разных авторов. Мы вернемся к этому вопросу в следующем разделе.

Первые фотоэлектрические наблюдения звезд были выполнены на рубеже первого и второго десятилетий XX в. До середины 1950-х гг. большое количество наблюдений было выполнено в разных реализациях двухцветных систем. К сожалению, эти работы выполнялись в своих собственных системах, не придерживаясь каких-либо стандартных кривых реакции. Эти результаты имеют сейчас лишь исторический интерес. Из важных достижений того времени следует назвать разработанный В. Б. Никоновым оригинальный метод учета ослабления света в земной атмосфере [2, 3].

Первой действительно многоцветной системой явилась система, реализованная в 1940-е гг. Стеббинсом и Уитфордом [4]. Она осно-

Таблица 1. Фотометрические полосы шестичветной системы Стеббинса—Уитфорда

	U	V	B	G	R	I
$\lambda_0, \text{\AA}$	3 530	4 220	4 880	5 700	7 190	10 300
$\Delta\lambda, \text{\AA}$	400	840	1 200	1 100	1 700	1 800

вывалась на фотоэлектрических наблюдениях и состояла из шести фотометрических полос, имеющих обозначения, средние длины волн и полуширины, приведенные в табл. 1. Всего в системе $UVBGR I$ наблюдалось около 1 400 звезд. На основе этих наблюдений впервые был получен ряд важных результатов. Назовем только три из них. Во-первых, впервые были исследованы вариации закона межзвездного покраснения в разных областях Млечного Пути. Во-вторых, было показано, что на двухцветной диаграмме $(U-B)-(B-I)$ звезды главной последовательности образуют изгиб, вызванный бальмеровским скачком (см. следующий раздел). В-третьих, было доказано, что на основе двухцветных диаграмм можно определять величину межзвездного покраснения для звезд ранних спектральных классов главной последовательности.

Триумф UBV

С конца 1930-х и до начала 1950-х гг. выдающиеся астрофотометристы этого времени Стеббинс, Уитфорд, Эгген и молодой Гарольд Джонсон активно пытались реализовать интернациональную систему фотоэлектрическими методами. Эта реализация, названная системой P, V , состояла из двух полос со средними длинами волн 4 215 и 5 240 \AA . Основными стандартами были приняты 9 звезд из числа объектов NPS. Внутренняя точность измерений была весьма высокой, однако оказалось, что показатели цвета $P-V$, определенные по наблюдениям различных авторов, связаны нелинейными и неоднозначными соотношениями. Причину этого понял в конце 1940-х гг. сотрудник обсерватории Макдональд Гарольд Джонсон. Он обнаружил, что причиной расхождений является неодинаковое включение ультрафиолетового излучения в области бальмеровского скачка в синюю фотометрическую полосу. Джонсон понял, что наиболее про-

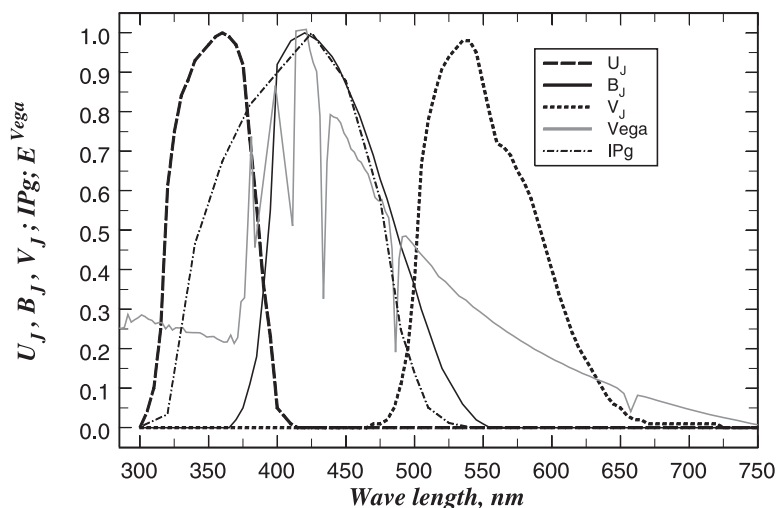


Рис. 1. Кривые реакции системы UBV , положение полосы IPg интернациональной системы и относительное распределение энергии в спектре звезды спектрального типа A0 V

стой способ справиться с проблемой — это добавить в состав синей кривой реакции светофильтр, обрезающий ультрафиолетовое излучение бальмеровского скачка.

Заслуга Джонсона состояла еще и в том, что он по возможности строго определил и опубликовал кривые реакции системы UBV . Они показаны на рис. 1.

В 1951 и 1953 гг. в *Astrophysical Journal* были опубликованы две статьи Джонсона и Моргана [5, 6], которые положили начало новой эпохе звездной фотометрии: эпохе системы UBV .

Со свойственными ему энергией, старанием и усердием Джонсон с различными соавторами выполнил с системе UBV многочисленные наблюдения большого количества звезд. Среди них были яркие звезды, звезды в различных участках неба, звезды рассеянных и шаровых звездных скоплений и др.

Нуль-пункт величин V системы UBV , был перенесен из интернациональной системы с помощью девяти звезд Северного Полярного Ряда. Опираясь на этот нуль-пункт, были определены величины десяти первичных стандартов системы UBV , разнесенных вокруг

всего неба. Нуль-пункты показателей цвета $U-B$ и $B-V$ были определены как среднее значение инструментальных показателей цвета для шести избранных звезд спектрального типа A0 V. Таким образом, в системе UBV

$$U-B = B-V = 0 \quad (4)$$

для звезд спектрального типа A0 V.

Система UBV благодаря строгому определению, точности и обилию стандартов получила широкое распространение и полностью вытеснила из употребления интернациональную систему IPg, IPv . Жан-Клод Мермийо из Лозаннской обсерватории регулярно публикует сводку измерений в системе UBV [7–11]. В настоящее время она содержит измерения более чем для 100 000 звезд.

В период с 1959 по 1966 г. Джонсон постепенно прибавил к полосам U , B и V целую последовательность фотометрических полос в красной и инфракрасной спектральных областях: появились полосы R , I , J , K , L , M , N и Q . Мендоза в 1967 г. дополнил эту последовательность еще одной полосой H . Средние длины волн и полуширины всех этих полос приведены в табл. 2. Положения инфракрасных полос подобраны так, чтобы они совпадали с окнами атмосферной прозрачности. Величины U , B и V измерялись фотоумножителем с сурьмяно-цезиевым фотокатодом, величины R и I — фотоумножителем с серебряно-кислородно-цезиевым катодом, величины J , K , L — фотосопротивлением PbS, охлаждаемым жидким азотом, величины M , N и Q — германиевым болометром, охлаждаемым жидким гелием. После появления системы $UBVR I J H K L M N$ система Стеббинса и Уитфорда $UVBGR I$ потеряла прежнее значение.

Таблица 2. Многоцветная фотометрическая система Джонсона

Величина	λ_0 , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	Величина	λ_0 , мкм	$\Delta\lambda$, мкм
U	0.36	0.04	H	1.62	0.2
B	0.44	0.10	K	2.2	0.6
V	0.55	0.08	L	3.5	0.9
R	0.70	0.21	M	5.0	1.1
I	0.88	0.22	N	10.4	6.0
J	1.25	0.30	Q	20.0	5.5

Несколько слов о среднеполосных системах

Система UBV является широкополосной фотометрической системой. Такие системы, безусловно, обладают тем преимуществом, что в широкие полосы поступает много света, что позволяет на телескопах умеренного размера наблюдать слабые звезды и применять достаточно простую аппаратуру. Широкополосные системы можно успешно использовать для решения задач идентификации небесных объектов и изучения переменности их блеска. Но в задаче о проведении многомерной спектральной классификации широкополосные системы менее эффективны. Чтобы проводить спектральную классификацию на основе широкополосной фотометрии нужно быть уверенным в том, что соблюдается целый ряд дополнительных требований, таких, например, как знание класса светимости или отсутствие межзвездного покраснения. Поэтому, естественно, возникла задача создать фотометрические системы, с помощью которых можно было бы оценивать физические параметры звезд. Такие системы должны иметь большее количество полос, размещенных в характерных участках спектра звезды.

В визуальном окне прозрачности атмосферы нельзя разместить более пяти неперекрывающихся полос с шириной порядка $1\,000\text{ \AA}$. Такие полосы в любом случае будут аналогичны полосам U , B , V , R и I . Чтобы расставить большее число полос, они должны быть более узкими. С такой задачей могут справиться среднеполосные фотометрические системы с полушириной полос $100\text{--}300\text{ \AA}$.

Одной из наиболее популярных среднеполосных систем является система $uvby\beta$, созданная Б. Стремгренем [12, 13] для трехмерной (!) классификации непокрасневших звезд ранних спектральных классов по спектральным классам, классам светимости и металличности. В системе шесть полос. Из них пять — среднеполосные, и одна узкополосная. Их средние длины волн и полуширины приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры полос фотометрической системы Стремгрена

Полоса	u	v	b	y	β_1	β_2
$\lambda_0, \text{ \AA}$	3 500	4 110	4 670	5 470	4 860(H_β)	4 860(H_β)
$\Delta\lambda, \text{ \AA}$	300	190	180	230	150	15 или 30

Из величин, получаемых в системе $uvby\beta$, составляются четыре индекса:

$$b-y, c_1 = (u-v) - (v-b), \\ m_1 = (v-b) - (b-y) \text{ и } \beta = m(15 \text{ \AA}) - m(150 \text{ \AA}).$$

Индекс $b-y$ является температурным индексом и по своим свойствам аналогичен показателю цвета $B-V$ системы UBV . Индекс c_1 измеряет высоту бальмеровского скачка. Индекс m_1 является мерой интенсивности спектральных линий поглощения, расположенных вокруг H_δ , поэтому он является индексом металличности.

Для непокрашенных звезд система Стремгрена позволяет отделить сверхгиганты спектрального класса В от В-звезд главной последовательности, а для звезд спектральных классов А—F проводить классификацию по светимости. Однако с помощью полос u , v , b и y невозможно отделить покрасневшие звезды V класса светимости от непокрашенных звезд III класса светимости. Для того чтобы провести такое разделение пришлось дополнить систему еще двумя полосами β_1 и β_2 , предложенными Д. Крауфордом. Обе они центрированы на линию поглощения H_β , но имеют разную ширину. Полуширина полосы β_1 составляет 150 Å, а полуширина полосы β_2 — 15 Å (в позднейших работах фильтр 15 Å был заменен фильтром 30 Å). Индекс $\beta = -2.5 \lg (\beta_2/\beta_1)$ измеряет интенсивность линии H_β по отношению к непрерывному спектру вокруг нее и обладает тем важным свойством, что не зависит от межзвездного покраснения. Для звезд В и ранних А он сильно зависит от светимости, и поэтому диаграммы $(\beta, b-y)$ или (β, c_1) для этих звезд (после учета межзвездного покраснения) дают хорошую двумерную классификацию. Для двумерной классификации звезд поздних подклассов А и класса F очень хорошо подходит диаграмма (β, c_1) , но для этих звезд уже c_1 измеряет светимость, а β — температуру. Стремгрен и Крауфорд разработали последовательность действий, с помощью которой возможна трехмерная классификация.

Система $uvby\beta$ представляет собой пример системы, для которой достаточно подробно рассчитаны калибровки для определения температур, абсолютных звездных величин и факторов содержания металлов. Система неплохо работает при классификации ранних звезд. Однако для звезд классов G—K—M она не приспособлена. Задача фотометрической классификации звезд в широком диапазоне спектров была поставлена в Вильнюсе.

Вильнюсская система и проблема определения межзвездной экстинкции

Сначала на примере данных, полученных в системе UBV , рассмотрим один из самых важных видов представления фотометрической информации. Это двухцветные, или двухиндексные, диаграммы. Если в фотометрической системе более двух полос, то можно составить более одного показателя цвета и представить на диаграмме зависимость одного показателя от другого.

На рис. 2. показана диаграмма $(U-B)-(B-V)$ для звезд, входящих в Каталог ярких звезд (Bright Star Catalogue) [14]. Видно, что подавляющее большинство звезд образуют на диаграмме плавную, но немонотонную последовательность, волнистую полосу. Линия, соединяющая положения на двухцветной диаграмме непокрашенных звезд различных спектральных классов одного класса светимости, называется линией нормальных показателей цвета (часто говорят «линия нормальных цветов»).

На графике, особенно в области наиболее горячих звезд, выделяется группа точек, явно отклоняющихся от линии нормальных цветов. Излучение этих звезд подверглось влиянию межзвездного поглощения света. Если бы мы, нанося на двухцветную диаграмму наблюдательные данные, сразу умели отбирать только точки, соответствующие звездам одного определенного класса светимости, то для не слишком далеких от Солнца звезд, не испытавших существенного поглощения межзвездным веществом, мы могли бы сразу производить спектральную классификацию. На линии нормальных показателей цвета, т. е. на последовательности непокрашенных звезд одного класса светимости, каждый спектральный подкласс занимает определенное место. Для звезд с нормальным химическим составом спектральная классификация по фотометрическим данным может производиться с погрешностью $\pm 2-3$ спектральных подкласса. Но на эту принципиальную возможность решения задачи накладывается масса осложнений. Во-первых, линии нормальных показателей цвета для разных классов светимости на плоскости двухцветной диаграммы $(U-B)-(B-V)$ в некоторых точках пересекаются или идут близко друг к другу. Например, в области В-звезд нельзя отличить главную последовательность от гигантов. Несмотря на различную светимость, распределения энергии в их спектрах дают в системе UBV практически одинаковые показатели цвета. А вот сверхгиганты в диапазоне спектральных классов от О до ранних А отделить от

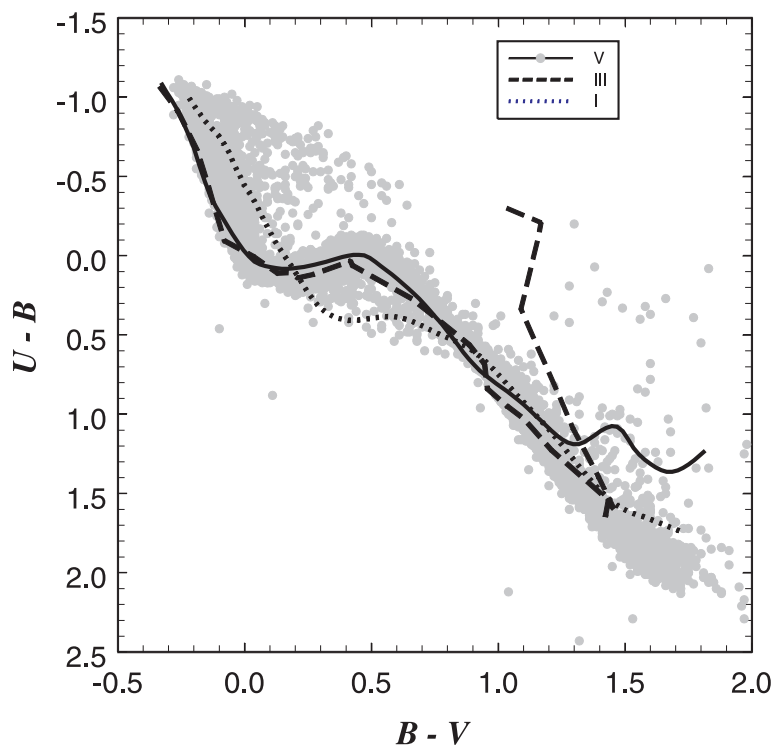


Рис. 2. Двухцветная диаграмма для показателей цвета системы UBV . Серые заполненные кружки соответствуют объектам из Каталога ярких звезд. Сплошной, штриховой и пунктирной линиями, соответственно, показаны средние линии нормальных показателей цвета для главной последовательности, гигантов и сверхгигантов

главной последовательности можно! Они имеют более красные показатели цвета $B-V$. Кроме этого, в области бальмеровского скачка сверхгиганты имеют более голубые, чем главная последовательность, показатели цвета $U-B$, из-за чего в области А-звезд линия сверхгигантов идет ниже главной последовательности; у сверхгигантов в системе UBV нет нарушения монотонности зависимости $U-B$ от $B-V$. Далее, в районе К-звезд все три последовательности идут очень тесно, но сильно расходятся в области спектрального класса М.

В этой зоне главная последовательность и сверхгиганты сохраняют свойство увеличения показателей цвета с понижением температуры, хотя количественно эти зависимости различаются. А вот линия гигантов резко загибается вверх и даже уходит несколько влево. Для гигантов ни $U-B$, ни $B-V$ не являются функциями температуры. Для красных гигантов величина показателей цвета определяется не температурой, а интенсивностью полос поглощения металлов (прежде всего титана и магния) и их окислов. Итак, если известен класс светимости, а излучение звезды не искажено покраснением, то можно везде, за исключением области красных гигантов, определить спектральный класс звезды по значению показателя цвета $B-V$. Не так обстоит дело при наличии межзвездного поглощения. При прохождении света через межзвездное вещество распределение энергии в спектре искажается, показатели цвета увеличиваются. Звезда со своего места на линии нормальных показателей цвета смещается по обеим координатам в сторону увеличения показателей цвета. Линии, по которым происходит это смещение, называют линиями покраснения, или линиями нарастающего поглощения. Они показаны на рис. 3.

К сожалению, на диаграмме $(U-B)-(B-V)$ линии нарастающего поглощения могут проходить так, чтобы пересекать линию нормальных показателей цвета несколько раз. Это мешает однозначной спектральной классификации, и для определения спектрального класса по фотометрическим данным требуются другие приемы.

Представим себе, что звезда по прямой линии покраснения переместилась из точки с координатами $(U-B)_0, (B-V)_0$ на последовательности нормальных показателей цвета в новую точку с координатами $(U-B), (B-V)$. Разности

$$E(U-B) = (U-B) - (U-B)_0 \quad \text{и} \quad E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0 \quad (5)$$

называются избытками цвета. Перепишем первое из равенств (5) в виде

$$(U-B)_0 = (U-B) - E(U-B) = (U-B) - E(B-V) \frac{E(U-B)}{E(B-V)} \quad (6)$$

с учетом второго уравнения (5) имеем

$$(U-B)_0 = (U-B) - [(B-V) - (B-V)_0] \frac{E(U-B)}{E(B-V)} \quad (7)$$

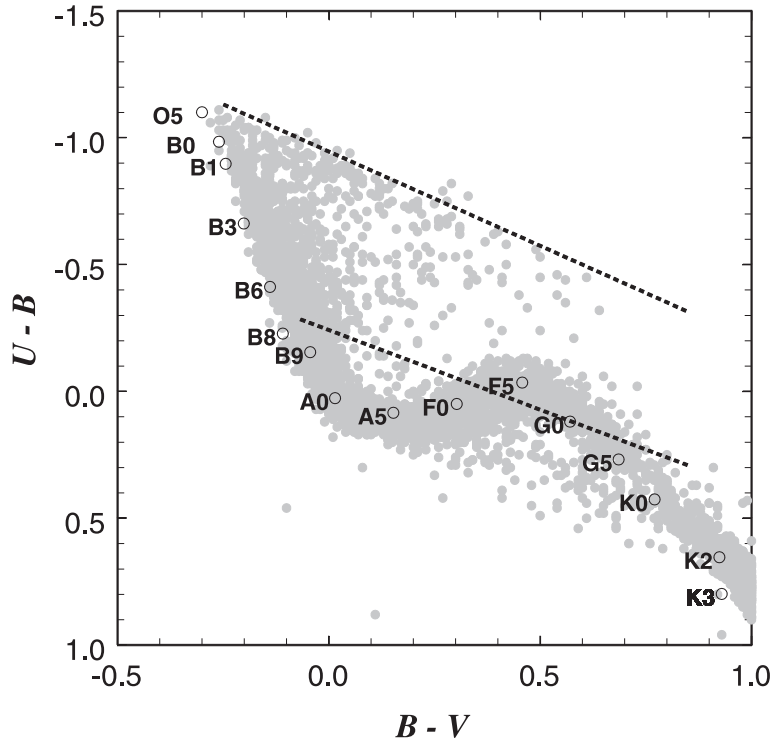


Рис. 3. Линии нарастающего поглощения на двухцветной диаграмме $(U-B)-(B-V)$

Раскрывая в (7) квадратные скобки и перегруппируя члены, получаем

$$(U-B)_0 - \frac{E(U-B)_0}{E(B-V)_0}(B-V) = (U-B) - \frac{E(U-B)}{E(B-V)}(B-V) = Q_{UBV}. \quad (8)$$

Величина, обозначенная Q , замечательна тем, что не зависит от межзвездного поглощения. С величинами Q также можно строить двухиндексные диаграммы Q — показатель цвета или $Q-Q$. Методы спектральной классификации, основанные на использовании величины Q , принято называть Q -методами. В случае четырехполосной системы такой, например, как $UBVR$, можно составить несколько

Q -индексов, а именно: Q_{UBV} , Q_{BVR} , Q_{UBVR} и др. К сожалению, двумерные зависимости Q — спектральный класс, Q — показатель цвета и $Q-Q$ обычно имеют сложный, нелинейный вид. Более того, линия может оказаться самопересекающейся. Могут тесно сближаться и пересекаться линии для звезд разных классов светимости. Однако на них можно выделять определенные области, в которых можно проводить спектральную классификацию фотометрическими методами в условиях наличия межзвездного поглощения.

Подчеркнем, что если придерживаться абсолютно строгих позиций, то, не зная ни спектрального типа, ни межзвездного покраснения, т. е. не имея хотя бы грубого представления о распределении энергии во внеатмосферном спектре звезды, невозможно правильно определить поправку выноса за атмосферу и перевести звездные величины из одной фотометрической системы в другую. Сила методов многоцветной фотометрии в том, что она дает нам представление о распределении энергии в спектре.

К настоящему времени создано несколько десятков среднеполосных фотометрических систем. Они создавались для решения фотометрическим путем задачи двумерной или трехмерной спектральной классификации (нахождения спектрального класса, класса светимости и степени металличности).

Однако, вот что писал В. Страйжис в 1977 г.:

«Ни одна из созданных ранее фотометрических систем не давала возможности проводить многомерную спектральную классификацию звезд при наличии межзвездного покраснения во всем интервале температур — от самых горячих до самых холодных. Все они ограничиваются или звездами какого-либо сравнительно узкого интервала спектральных классов, или обеспечивают классификацию только при отсутствии межзвездного покраснения».

Задача создания фотометрической системы, обеспечивающей эффективную классификацию по спектральным классам и классам светимости в полном интервале спектральных классов для покрасненных звезд с различным содержанием металлов была поставлена и решена в Вильнюсе. Понятно, что для этого нужно было выбрать расположение и полуширину фотометрических полос среднеполосной системы самым оптимальным образом. Основой выбора служили детальные данные о распределении энергии в спектрах звезд разнообразных спектральных типов и о законе межзвездного покраснения. Окончательное положение и ширина полос выбирались путем чис-

ленных экспериментов. Вычисляя свертки функций распределения энергии в спектрах звезд разных типов с предполагаемыми кривыми реакции полос и функциями межзвездной и атмосферной экстинкции, рассчитывались различные варианты двухцветных диаграмм, диаграмм (кolor-индекс — Q) и $(Q-Q)$. Варьируя расположение, полуширину и форму полос пропускания, вильнюсским исследователям удалось найти решение, наиболее близко соответствующее поставленной задаче.

Средние длины волн и полуширины полос Вильнюсской системы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры полос Вильнюсской фотометрической системы

полоса	U	P	X	Y	Z	V	S
$\lambda_0, \text{\AA}$	3 450	3 740	4 050	4 660	5 160	5 440	6 550
$\Delta\lambda, \text{\AA}$	400	260	220	260	210	260	200

В Вильнюсской системе все колор-индексы нормированы по условию равенства нулю всех показателей цвета для непокрасневших звезд спектрального класса О. В этой системе проведены измерения более чем 15 000 звезд.

Покажем, как проводится классификация звезд по температурам и светимостям на примере разделения по светимостям звезд спектрального класса G с помощью индексов Вильнюсской фотометрической системы. Поскольку классификацию нужно производить при наличии межзвездного поглощения, основным инструментом должны быть двухиндексные (Q, Q) диаграммы.

Будем считать, что нам уже удалось выделить из общей массы звезды спектральных классов О, В, А и F, а среди них выделить сверхгиганты. В Вильнюсской системе для этого используются диаграммы Q_{UPY}, Q_{PYV} и Q_{UPY}, Q_{XYV} .

Классификация G-звезд проводится по диаграмме Q_{UPY}, Q_{XZS} . Она показана на рис. 4. Хорошо видно, как разделение звезд по светимостям увеличивается по мере перехода к более поздним спектральным классам.

Отметим, что наиболее поздние звезды разделяются по светимостям на диаграмме Q_{XZS}, Q_{XYZ} .

Вспомним, что из величин в четырех фотометрических полосах m_1, m_2, m_3 и m_4 , можно составить индекс Q , который, по определе-

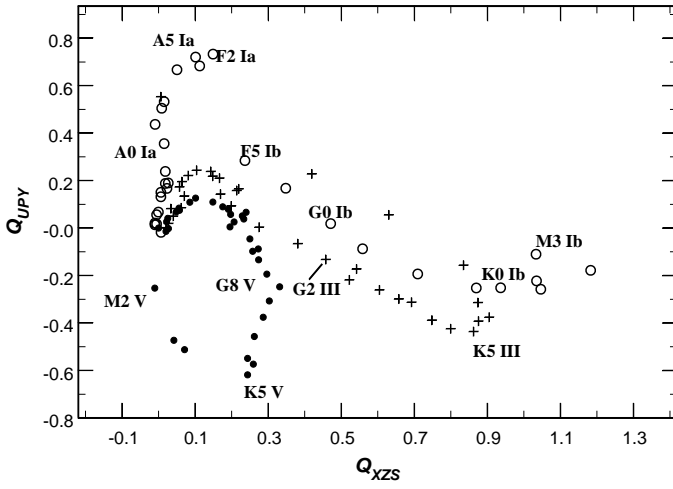


Рис. 4. Диаграмма Q_{UPY}, Q_{XZS} для классификации звезд G. Заполненные кружки — звезды главной последовательности, прямые крестики — нормальные гиганты, пустые кружки — сверхгиганты

нию, равен

$$Q_{m_1, m_2, m_3, m_4} = (m_1 - m_2) - \frac{E(m_1 - m_2)}{E(m_3 - m_4)}(m_3 - m_4). \quad (9)$$

Предположим, что случайная среднеквадратичная ошибка определения звездных величин во всех четырех полосах одинакова и равна $\sigma_m = \pm 0.01^m$. Это типичная ошибка для наземной фотоэлектрической фотометрии. Отношение избытков цвета $E(m_1 - m_2)/E(m_3 - m_4)$ по порядку величины равно единице. Отсюда следует, что случайная среднеквадратичная ошибка определения параметра Q составит $\sigma_Q = \pm \sqrt{4\sigma_m^2} = \pm 0.02^m$. Значит, в пределах $\pm 2\sigma_Q$, т. е. с вероятностью около 95 %, точное значение индекса Q будет находиться в квадрате ошибок со стороной 0.08^m . А это уже совсем не маленькая ошибка!

Вывод: чтобы Q -метод давал хорошие результаты, нужно иметь весьма точные фотометрические измерения, так что даже погрешность $\pm 0.01^m$ может оказаться недопустимо большой.

Вильнюсская система обладает также некоторыми возможностями классифицировать звезды по металличности и другим особенностям химического состава атмосфер, выделять белые карлики, обнаруживать двойные звезды, звезды с быстрым осевым вращением и пр. Эти вопросы обсуждаются в другой монографии В. Страйжиса: «Звезды с дефицитом металлов» [15].

Впоследствии обе книги Страйжиса были объединены в единый том на английском языке [16].

Гиппаркос и Тихо

В конце XX в. Европейским космическим агентством был выполнен грандиозный проект. На космическом аппарате Hipparcos был выполнен обзор всего неба [17–19]. В результате для 118 тыс. звезд были получены высокоточные положения, собственные движения и звездные величины в одной фотометрической полосе H_r (собственно эксперимент Hipparcos). Дополнительно координаты и звездные величины в двух фотометрических полосах B_T и V_T были определены для двух с половиной миллионов звезд (эксперимент Tycho). Ошибка индивидуального измерения величины H_r для звезд не слабее 9^m не превышает 0.0035^m . Ошибка индивидуального измерения величин B_T и V_T равна примерно 0.1^m . Каждый объект в обзорах Hipparcos и Tycho измерялся за время эксперимента примерно 100 раз. Считая, что фотометрические ошибки величин непременных звезд имеют нормальное распределение, получаем, что типичная среднеквадратичная ошибка среднего значения звездной величины в эксперименте Hipparcos составляет примерно 0.0004^m , а в эксперименте Tycho — 0.01^m .

В совокупности три фотометрические полосы H_r , B_T и V_T составляют трехцветную фотометрическую систему, обладающую некоторыми классификационными возможностями. Между тем, анализ этих трех кривых реакции, выполненный Майклом Бесселлем [20], показал, что реальные кривые реакции детекторов на спутнике Hipparcos, отличаются от опубликованных. Данные о фотометрических полосах проекта Hipparcos приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры полос фотометрической системы эксперимента Hipparcos

полоса	по данным ESA [17]			по Бесселлю [20]		
	$\lambda_{max}, \text{\AA}$	$\lambda_{mean}, \text{\AA}$	$\Delta\lambda, \text{\AA}$	$\lambda_{max}, \text{\AA}$	$\lambda_{mean}, \text{\AA}$	$\Delta\lambda, \text{\AA}$
H_r	4 525	5 200	2 500	4 800	5 420	2 290
B_T	4 350	4 200	800	4 350	4 210	690
V_T	5 050	5 400	900	5 100	5 270	1 040

GAIA и «Лира»

В настоящее время есть практическая возможность организовать многоцветный обзор неба с борта космического аппарата. Это означает, что можно будет строить фотометрическую систему опираясь только на особенности распределений энергии в спектре звезд, а не на расположение окон прозрачности атмосферы Земли. При этом встает задача рассчитать такую фотометрическую систему, которая справлялась бы с многомерной классификацией звезд лучше, чем Вильнюсская система. Поскольку полосы можно будет располагать в значительно более широком интервале длин волн, есть уверенность, что эта задача имеет решение.

Главная цель проекта GAIA, подготавливаемого Европейским космическим агентством, — сделать количественную оценку процессов, описывающих формирование и последующую динамическую и химическую эволюцию Млечного Пути и процессов звездообразования. Предполагается уточнить происхождение и историю нашей Галактики путем проверки различных теорий ее формирования и происхождения и эволюции звезд.

GAIA является совместным проектом, к которому участвуют около 200 ученых из примерно 50 институтов. Основной задачей эксперимента GAIA является измерение координат небесных объектов с беспрецедентной точностью. Предполагается получить координаты с погрешностью, не превышающей $7 \mu\text{as}$ при $V < 10^m$, $12\text{--}25 \mu\text{as}$ при $V = 15^m$ и $100\text{--}300 \mu\text{as}$ при $V = 20^m$. Общее количество измеряемых объектов должно быть около 1 000 000 000. Кроме астрометрических задач GAIA предполагает получить лучевые скорости с погрешностью $\sigma = 1 \text{ км/с}$ для звезд с $V = 13^m$ и $\sigma = 15 \text{ км/с}$ для звезд с $V = 17^m$. Важной частью проекта являются фотометрические измерения. Фотометрия является совершенно необходимой для учета хроматических аберраций в фокальной плоскости, без чего невозможно

достигнуть микроарксекундной точности. Научные цели GAIA требуют получения совместных данных об астрометрии, фотометрии и лучевых скоростях, причем главной целью фотометрии является определение астрофизических параметров наблюдаемых объектов.

В рамках настоящей лекции нет возможности привести описание всей аппаратуры, которая будет установлена на космическом аппарате GAIA. Остановимся только на фотометрической аппаратуре. Предполагается проводить измерения в «белом» свете, а также получить многоцветную фотометрию.

Измерения в «белом» свете будут проводиться в основной части фокальной плоскости в сверхширокой фотометрической полосе G , охватывающей спектральный диапазон от 300 до 1000 нм. За одно прохождение через поле зрения (через 11 ПЗС матриц) ожидается иметь погрешность измерения величины G примерно 0.2^m для $V = 23^m$, 0.01^m для $V = 19^m$ и менее 0.001^m для $V < 14^m$. За все время миссии, рассчитанной на 5 лет для каждого объекта в среднем будет произведено 82 наблюдения и ожидаемая погрешность фотометрии в «белом» свете составит примерно 0.03^m для $V = 23^m$, менее чем 0.001^m для $V < 18^m$ и менее 0.0001^m для $V < 14^m$.

Многоцветная фотометрия будет проводиться следующим образом. Свет звезды дважды будет разложен в спектр с помощью двух бесщелевых спектрографов, один из которых рассчитан на спектральную область 330–630 нм (blue photometer), а другой (red photometer) — на спектральную область 630–1050 нм. Далее, накопленный сигнал будет просуммирован по пикселям, относящимся к различным группам длин волн, чтобы сформировать фотометрические полосы. Всего предполагается сформировать 14 полос (8 на blue photometer и 6 на red photometer) со средними длинами волн: 344, 379, 395, 410, 467, 506, 515, 549, 656, 716, 747, 825, 861 и 965 нм.

О российском проекте «Лира» уже был доклад на конференции «Физика космоса» в 2008 г. [21]. Предполагаемые фотометрические полосы 10-цветной фотометрической системы «Лира» перечислены в табл. 6. Для измерений наиболее ярких объектов будет применяться специальный режим.

В последнее время нами было показано, что предложенная фотометрическая система весьма эффективна для определения величины межзвездной экстинкции, а также может использоваться для измерения металличности. Мы рассчитали несколько диаграмм, используя атласы распределений энергии в спектрах методом синтетической фотометрии. В качестве исходных данных использовались атлас

Таблица 6. Фотометрические полосы российского эксперимента «Ли́ра» и ожидаемые предельные величины для уровней среднеквадратической погрешности 0.01 и 0.1^m

λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Ярчайшие (mag)	Слабейшие (mag)		
			за 1 наблюдение $\sigma = 0.01$	за 1 наблюдение $\sigma = 0.1$	за все время $\sigma = 0.01$
195	20	6,0	9,0	13,6	13,7
218	20	6,0	8,9	13,6	13,6
270	25	6,2	9,2	13,8	13,9
350	50	7,6	10,5	15,1	15,2
440	100	8,8	12,5	16,9	17,0
550	80	8,0	11,7	16,1	16,2
700	80	6,6	10,7	15,0	15,1
825	80	5,6	9,7	14,0	14,1
930	80	4,3	8,7	12,9	12,9
1 000	100	3,3	7,7	11,9	12,0

средних эмпирических распределений энергии, составленный Пиклсом [22] и два атласа теоретических распределений энергии [23, 24].

На традиционной диаграмме $(U-B)-(B-V)$ покраснение может быть определено только для интервала спектральных классов O—B3 (см. рис. 3). Лишь для этих спектров нет множественных пересечений линии нормальных цветов и линии покраснения. Однако звезды ранних спектральных классов редки, кроме того они обычно располагаются около областей звездообразования, где межзвездное вещество находится в особенных условиях. Звездные величины в ультрафиолетовых полосах фотометрической системы «Ли́ра» m_{195} , m_{218} и m_{270} и образуемые ими показатели цвета $(m_{195}-m_{218})$ и $(m_{218}-m_{270})$ дают возможность получить надежные значения покраснения для звезд O—F. Это показано на рис. 5. На этой диаграмме не только нет множественных пересечений линии нормальных цветов с линиями покраснения, но, более того, с увеличением количества межзвездного вещества индекс $(m_{218}-m_{270})$ возрастает, а индекс $(m_{195}-m_{218})$ уменьшается! Это связано с тем, что в соответствии с нормальным законом межзвездного поглощения $A(1/\lambda)$ в области около $\lambda = 218$ нм поглощающая способность межзвездного вещества резко увеличивается.

Используя двухцветную диаграмму $(m_{350}-m_{700})-(m_{700}-m_{930})$, можно определять покраснение по G—K звездам. Но самое эффективное — это обнаружившаяся возможность находить покраснение по M гигантам. Обычно наклон линии нормальных

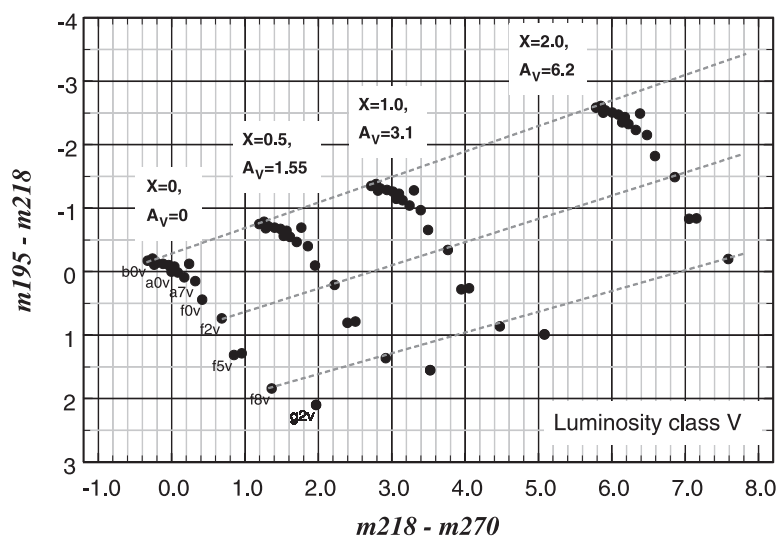


Рис. 5. Определение межзвездной экстинкции по O—F звездам

цветов, определяемый изменениями температуры, и наклон линии нарастающего поглощения близки друг к другу. Но диаграмма на рис. 6 показывает, что для наиболее красных звезд угол между этими линиями весьма не мал. Двухцветная диаграмма ($m_{440} - m_{550}$), ($m_{550} - m_{700}$) позволяет определять покраснение по звездам спектральных классов M4 и более поздних.

В заключение покажем диаграмму (рис. 7), позволяющую оценивать металличность звезд спектральных классов F—G—K—M. Для G-звезд эффект достигает 0.5 величины при изменении $[m/H]$ на одну единицу.

Мы продолжаем исследовать классификационные свойства фотометрической системы «Лира».

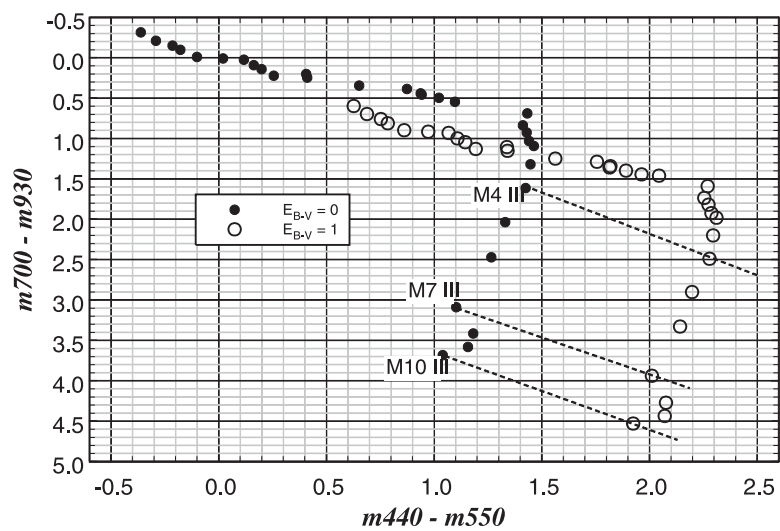


Рис. 6. Определение покраснения по красным гигантам

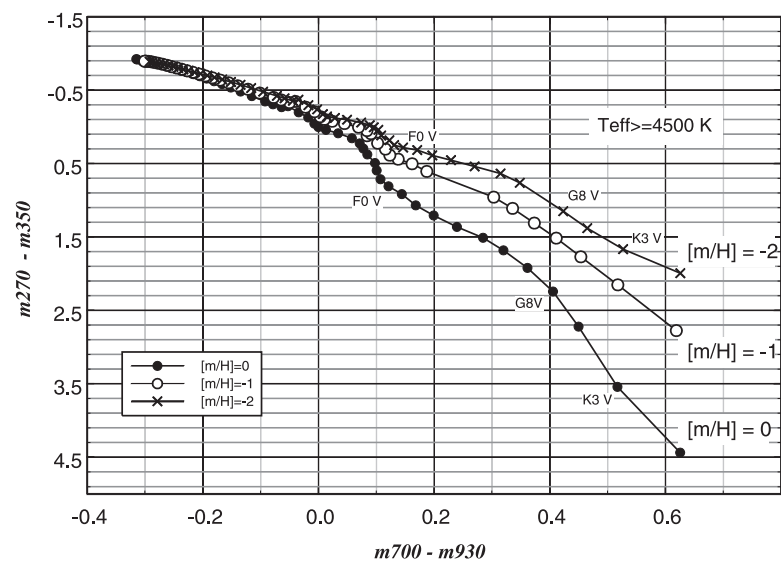


Рис. 7. Определение металличности в фотометрической системе «Ли́ра»

Список литературы

1. *Страйжис В. Л.* Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы. — Вильнюс: Мокслас, 1977.
2. *Никонов В. Б.* // Доклады АН СССР. — 1944. — Т. 45. — С. 151.
3. *Никонов В. Б.* // Известия Крымской астроном. обс. — 1976. — Т. 54. — С. 3.
4. *Stebbins J., Whitford A. E.* Six-color photometry of stars. I. The law of space reddening from the colors of O and B stars // *Astrophys. J.* — 1943. — Vol. 98. — P. 20.
5. *Johnson H. L., Morgan W. W.* On the Color-Magnitude Diagram of the Pleiades. // *Astrophys. J.* — 1951. — Vol. 114. — P. 522.
6. *Johnson H. L., Morgan W. W.* Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas // *Astrophys. J.* — 1953. — Vol. 117. — P. 313.
7. *Mermilliod J.* UBV photoelectric photometry catalogue (1986). I - The original data (magnetic tape) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1987. — Vol. 71. — P. 413–420.
8. *Mermilliod J. C.* UBV Photoelectric Catalog: data 1953-1985 (Mermilliod 1987) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2006. — Vol. 2122. — P. 0.
9. *Mermilliod J.* UBV Photoelectric Cat: Data 1986-1992 (Mermilliod 1994) // *VizieR Online Data Catalog.* — 1994. — Vol. 2193. — P. 0.
10. *Mermilliod J.* UBV photoelectric catalogue: 1986-1992 data // *Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires.* — 1994. — Vol. 45. — P. 3.
11. *Nicolet B.* Photoelectric photometric Catalogue of homogeneous measurements in the UBV System, Ed. by Nicolet, B. — 1978.
12. *Strömberg B.* Quantitative Classification Methods // *Basic Astronomical Data: Stars and stellar systems*, edited by K. A. Strand. Published by the University of Chicago Press, Chicago, IL USA, 1968, p.123 / Ed. by Strand, K. A. — the University of Chicago Press, 1963. — P. 123.
13. *Hauck B., Mermilliod M.* Uvbybeta photoelectric photometric catalogue // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 129. — P. 431–433.

14. *Hoffleit D., Jaschek C.* . The Bright star catalogue, Ed. by Hoffleit, D. & Jaschek, C. |. — 1991.
15. *Страйзис В. Л.* Звезды с дефицитом металлов. — Вильнюс: Мокслас, 1982.
16. *Straizhis V.* Multicolor stellar photometry, Ed. by Straizhis, V. — 1992.
17. *ESA.* The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997) // VizieR Online Data Catalog. — 1997. — Vol. 1239. — P. 0.
18. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission / Ed. by M. A. C. Perryman, ESA. — Vol. 1200 of ESA Special Publication, 1997.
19. *Høg E., Fabricius C., Makarov V. V. et al.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // Astron. Astrophys. — 2000. — Vol. 355. — P. L27—L30.
20. *Bessell M. S.* The Hipparcos and Tycho Photometric System Passbands // Publ. Astron. Soc. Pac. — 2000. — Vol. 112. — P. 961—965.
21. *Прохоров М. Е., Миронов А. В., Захаров А. И.* Российский космический фотометрический эксперимент «Лира-Б» // Физика космоса: Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 141—163.
22. *Pickles A. J.* A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1998. — Vol. 110. — P. 863—878.
23. *Lejeune T., Cuisinier F., Buser R.* Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1997. — Vol. 125. — P. 229—246. arXiv:astro-ph/9701019.
24. *Lejeune T., Cuisinier F., Buser R.* A standard stellar library for evolutionary synthesis. II. The M dwarf extension // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1998. — Vol. 130. — P. 65—75. arXiv:astro-ph/9710350.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ В ЗАДАЧЕ N ТЕЛ

Представлен обзор работ по поиску и изучению периодических орбит в задаче N тел. Обсуждаются основные подходы к решению этой проблемы с использованием численных экспериментов в рамках гравитационной задачи N тел. Особое внимание уделяется минимизации функционала действия. Обсуждается устойчивость найденных периодических орбит.

A review of papers concerning search for and studies of periodic orbits in the N -body problem is presented. Some main approaches to solution of this problem using numerical simulations in the gravitational N -body problem are discussed. A special attention is given to minimization of action functional. The stability of founded periodic orbits is discussed.

Введение

Со времени формулировки гравитационной задачи N тел Сэром Исааком Ньютоном в 1687 г. небесные механики занимаются поиском и исследованием точных решений этой фундаментальной задачи. Первые такие решения были найдены великими учеными Леонардом Эйлером в 1767 г. и Жозефом Луи Лагранжем в 1772 г. для $N = 3$. Траектории тел в этих случаях показаны на рис. 1. В решении Эйлера три тела всегда находятся на одной вращающейся прямой. В решении Лагранжа три тела находятся в вершинах вращающегося равностороннего треугольника. Наряду с вращением конфигурация трех тел может испытывать пульсации. Оба решения являются периодическими: через некоторое время (период решения) координаты и скорости в точности повторяются.

Дальнейшие успехи в изучении периодических орбит в задаче N тел связаны с работами Анри Пуанкаре. Пуанкаре предложил ряд общих подходов к изучению периодических решений динамических систем:

© В. В. Орлов, А. В. Рубинов, А. И. Мартынова, 2010

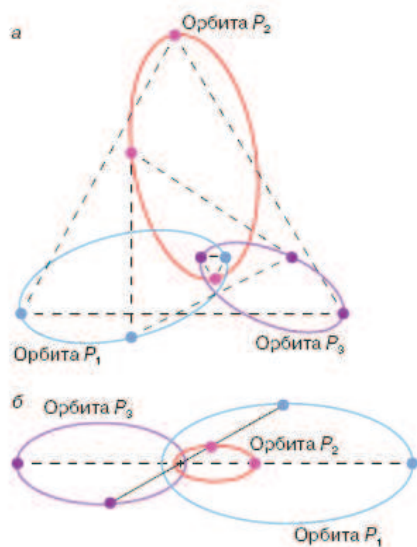


Рис. 1. Точные решения задачи трех тел, полученные Лагранжем (а) и Эйлером (б)

- применение принципа наименьшего действия для поиска экстремальных (в том числе периодических) решений как в неподвижной, так и вращающейся системах координат;
- поиск периодических решений второго рода (с кратными периодами);
- использование рядов для представления периодических решений.

По сути дела, можно сказать, что работы Пуанкаре заложили основы современных исследований периодических решений в задаче N тел. О вкладе Пуанкаре в решение проблемы поиска периодических орбит увлекательно написано в статье Шенсине [1].

С середины прошлого века поиск периодических решений в задаче N тел проводится численными методами. В этой связи отметим работу Шубарта [2] 1956 г., в которой численно была найдена периодическая орбита в прямолинейной задаче трех тел равных масс. Тела двигаются вдоль одной и той же неподвижной прямой, причем центральное тело периодически испытывает двойные соударения с крайними телами (см. рис. 2). Аналогичная орбита была найдена численно Бруком [3] в 1979 г. для плоской равнобедренной задачи

трех тел (см. рис. 3). В данном случае центральное тело движется вдоль прямой, перпендикулярной отрезку, соединяющему крайние тела, и проходящей через его середину. Оно совершает периодические колебания, а крайние тела испытывают двойные соударения в моменты разворота центрального тела. Еще одна замечательная орбита в форме «восьмерки» была обнаружена в работе Мура [4] в 1993 г. По этой замкнутой орбите тела движутся друг за другом без соударений.

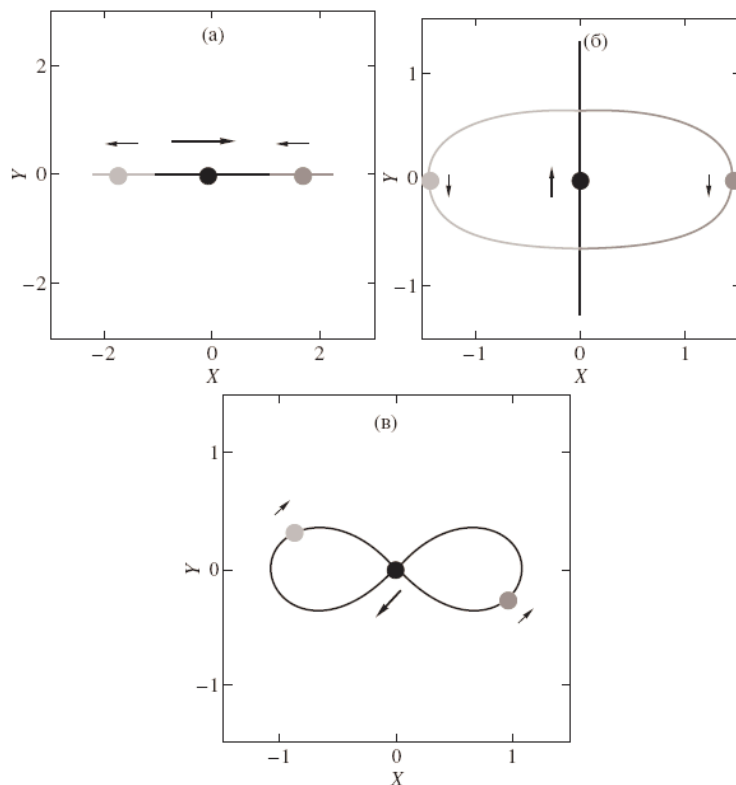


Рис. 2. Периодические орбиты: а) Шубарта [2]; б) Брука [3]; в) Мура [4]

С периодическими решениями в задаче N тел непосредственно связаны так называемые центральные конфигурации. Центральными конфигурациями называют такие начальные положения N тел, для которых в течение эволюции системы отношения взаимных рас-

стояний между телами остаются постоянными (см., например, статью Ллибре [5]). Среди центральных конфигураций могут быть такие, которые соответствуют периодическим решениям, и такие, которые соответствуют разлетам на бесконечность и соударениям всех тел в центре масс системы. В работе Ллибре [5] показано, что общее число центральных конфигураций N тел в k -мерном пространстве конечно и зависит от масс тел и размерности k пространства.

Начиная с 60-х гг. прошлого века, поиск и изучение свойств периодических и близких к ним движений в задаче N активно проводился с использованием численного интегрирования уравнений движения на компьютерах. В качестве примера можно привести работу Даву и Брука [6], в которой авторы численно нашли ряд семейств периодических орбит в плоской задаче трех тел с равными массами. Некоторые близкие к периодическим орбиты в плоском и пространственном случаях были отмечены в работе Аносовой и Орлова [7]. Фрагмент пространственной орбиты из этой работы представлен на рис. 3.

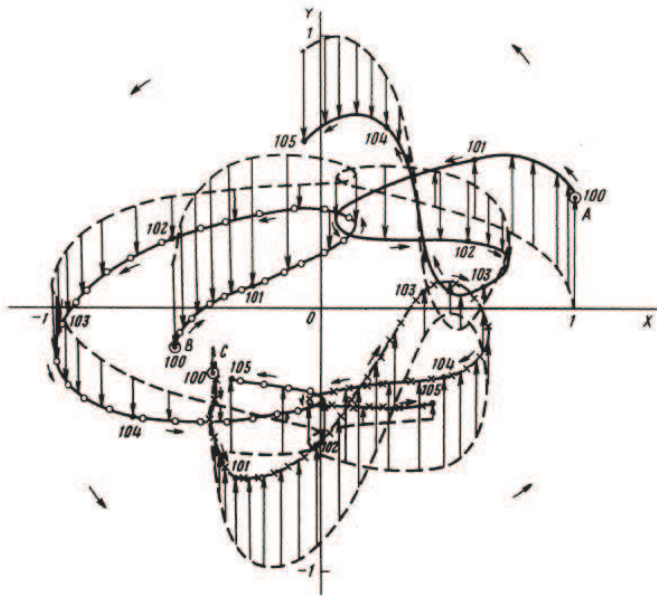


Рис. 3. Фрагмент близкой к периодической орбиты из работы [7]

Периодические орбиты в предельных случаях

Одним из предельных случаев задачи N тел является ограниченная задача, когда часть тел имеют нулевые массы, а массы остальных тел конечны. Простейшим случаем такой задачи является случай, когда одно из тел имеет ненулевую массу, а остальные тела (пробные частицы) имеют нулевые массы. В этом случае тела нулевой массы движутся относительно массивного тела по кеплеровским орбитам. Все эллиптические орбиты являются периодическими.

Следующий по сложности вариант, когда имеются два массивных тела. В этом случае имеет место суперпозиция $N - 2$ ограниченных задач трех тел. Ограниченной задаче трех тел посвящено огромное множество работ, и мы на них останавливаться не будем. Если массы $N - 2$ отличны от нуля, но много меньше масс двух других (главных) тел, то можно получить периодические решения как аналитические продолжения решений ограниченной задачи (см., например, Хаджидеметриу [8]).

Еще один предельный случай задачи N тел — прямолинейная задача, когда все тела могут двигаться только вдоль одной неподвижной прямой. При $N = 3$ в этом случае известна периодическая орбита Шубарта [2] (см. рис. 2). Подробное исследование роли периодических орбит в прямолинейной задаче трех тел проведено в работе Сайто и Таникавы [9] (см. также ссылки в этой статье). В [9] показано, что, как правило, периодические орбиты порождаются основной орбитой Шубарта посредством бифуркаций. Среди них имеются доминирующие орбиты с числом вращения, равным $(n - 2)/n$, где $n \geq 3$ — целое число, причем для нечетных n имеются две доминирующие орбиты, а для четных n — четыре. Доминирующие орбиты образуют большие зоны устойчивости внутри и вне области устойчивости, порожденной самой орбитой Шубарта. Для поиска начальных условий для периодических решений авторы [9] используют методы символической динамики (см. ниже).



Рис. 4. Задание начальных условий в симметричной прямолинейной задаче четырех тел из работы [10]

Для прямолинейной задачи четырех тел поиск периодических орбит был проведен в работе Секигучи и Таникавы [10]. Эти авторы рассмотрели симметричный случай (см. рис. 4).

Используя средства символической динамики и численное моделирование, авторы находят начальные условия для периодических решений. Авторы отмечают сходство между прямолинейными задачами трех и четырех тел: во втором случае имеются квазипериодические решения, подобные орбите Шубарта для первого случая и неустойчивые периодические орбиты.

Другим предельным случаем задачи N тел является равнобедренная задача, когда тела разделяются на две группы. Тела, принадлежащие каждой из групп, движутся вдоль неподвижных прямых линий, ортогональных друг другу и проходящих через центр масс системы N тел. В этом случае все тела движутся в одной плоскости.

Простейший случай таких систем реализуется при $N = 3$. В этом случае известна орбита Брука [3], показанная на рис. 2. Периодические орбиты в этом случае удобно изображать на плоскости $r - R$, где r — расстояние между двумя крайними телами, а R — расстояние между центральным телом и центром масс двойной, образованной крайними телами с равными массами. На рис. 5 приведены две периодические орбиты на плоскости $r - R$, взятые из работы Орлова и др. [11]. Первая из этих орбит — орбита Брука [3].

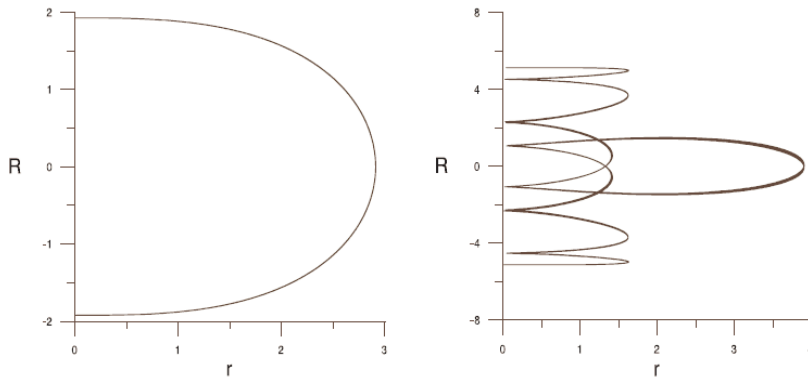


Рис. 5. Примеры двух периодических орбит в равнобедренной задаче трех тел равных масс из работы [11]

Вокруг орбиты Брука имеется область устойчивых движений. Типичная орбита из этой области показана на рис. 6. Размер обла-

сти устойчивости зависит от отношения массы центрального тела к массе одного из крайних тел. Он достигает максимальной величины в случае равных масс всех тел.

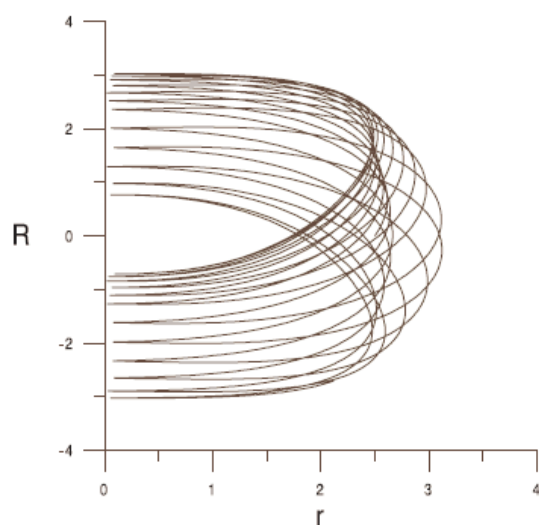


Рис. 6. Пример орбиты из зоны устойчивости, порожденной орбитой Брука [11]

Метод минимизации функционала действия

В 90-е гг. прошлого века идеи Пуанкаре о возможности использования экстремальных принципов для поиска и изучения периодических орбит получили новое развитие. Первым, кто использовал и развил эти принципы в применении к задаче N тел, был Мур [4]. Мур рассмотрел обобщенный потенциал взаимодействия между телами $V \propto r^\alpha$. Ньютоновскому потенциалу соответствует $\alpha = -1$. Он показал, периодические орбиты соответствуют минимуму функционала действия

$$S = \int_0^T (K - V) dt,$$

где K и V — кинетическая и потенциальная энергии системы N тел, T — период орбиты.

Мур также предложил топологическую классификацию орбит. Для наглядного представления орбит N он использует диаграммы, изображающие «косы» из N «прядей», которые строятся в трехмерном пространстве при движении N тел на плоскости. Диаграммы показывают на протяжении одного периода для каждого из тел изменение одной из пространственных координат (ось абсцисс) со временем (ось ординат), а также то, какая из «прядей» при их пересечении проходит выше (с учетом второй координаты). Примеры периодических орбит для случаев $N = \{2, 3\}$ и разных потенциалов V представлены на рис. 7. В последнем столбце показано, для каких α существует периодическая орбита данного типа.

Этот метод получил дальнейшее развитие в целом ряде работ (см., например, работы Вандербея [12], Террачини [13], Капелы и Симо [14]). Для нахождения конкретных периодических орбит авторы часто используют представление решения в виде отрезков рядов Фурье (см., например, работу Вандербея [12]).

На рис. 8 представлено несколько примеров периодических орбит для $N = 3$ —5 тел, которые были найдены в работе [12] методом минимизации функционала действия с помощью представления решения в виде ряда Фурье. Заметим, что на первых двух рисунках все тела ($N = 5, 4$) двигаются вдоль одной и той же кривой. Такие орбиты К. Симо были названы «хореографиями». Простейшим примером хореографий является орбита «восьмерка», представленная на рис. 2. Возможны также случаи, когда несколько тел двигаются вдоль одной кривой, а оставшиеся вдоль других кривых. Такие орбиты можно назвать «частичными хореографиями». Несколько таких примеров приведены на рис. 8. В нижнем ряду рис. 8 приведено четыре примера орбит в задаче трех тел с компонентами различных масс, когда витки траекторий двух тел взаимно ортогональны, а третье тело движется по кривой, близкой к окружности. Эти орбиты не являются хореографиями, даже частичными. Такие орбиты называются *Ducati* в честь старинной монеты.

Для описания и классификации периодических орбит в задаче N тел можно использовать методы теории групп (см., например, работы Террачини [13] для общего случая N тел и Титова [15] в применении к задаче трех тел). На рис. 9 представлено несколько примеров симметричных периодических орбит в общей плоской задаче трех тел из работы [15]. Во всех случаях все три тела двигаются по разным кривым (это не хореографии). В четырех случаях витки траекторий одного или двух тел образуют лепестковые структуры.

braid	b_i	orbit	existence
	b_1^2		exists for all α
	—		exists for all α
	$b_1^2 b_2^2$		$\alpha < -1.1 \pm 0.05$
	$b_1^2 b_2^{-2}$		$\alpha < -1.4 \pm 0.05$
	$(b_1 b_2)^3$		exists for all α
	$(b_1 b_2^{-1})^3$		$\alpha < 2$
	$(b_1^2 b_2)^2$		$\alpha < -1.0 \pm 0.05$
	$(b_1^2 b_2^{-1})^2$		$\alpha < -1.7 \pm 0.05$
	$b_1 b_2 b_1^{-1} b_2 b_1 b_2^{-1}$ $= b_1^2 b_2 b_1^{-2} b_2$		at least $\alpha \leq 2$

Рис. 7. Виды сплетений «прядей» в «косы» согласно [4]

В одном случае витки траекторий двух тел образуют петлеобразную структуру. Еще в одном случае они формируют замкнутые вогнутые кривые типа астроида.

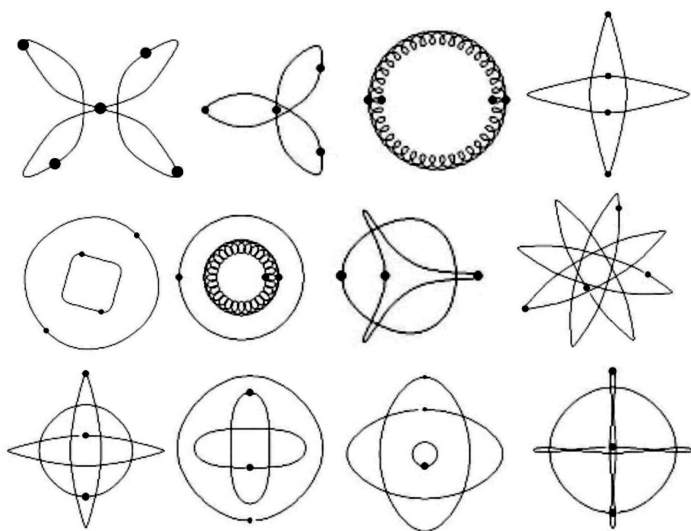


Рис. 8. Примеры периодических орбит из работы [12]

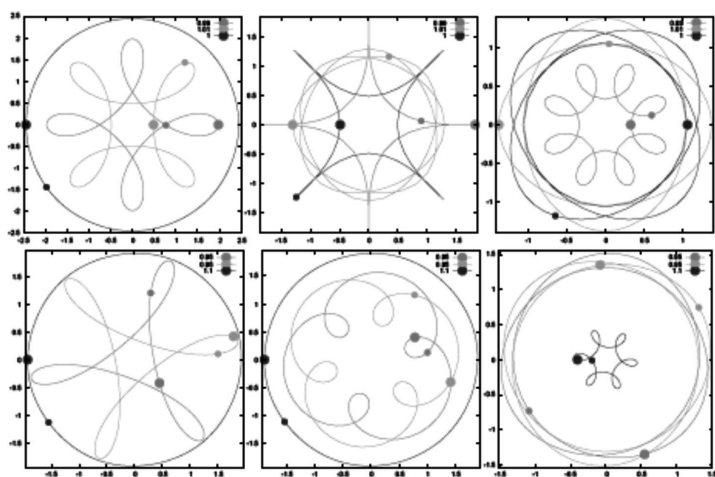


Рис. 9. Примеры периодических орбит из работы [15]

Периодические орбиты и символические последовательности

Одним из подходов к поиску и исследованию периодических орбит является использование методов символической динамики. Основная идея этого подхода состоит в построении некоторой последовательности символов, соответствующей реальной траектории движения N тел. Обычно символы обозначают определенные состояния в ходе эволюции системы (например, сближения или соударения определенной пары тел). Если последовательность символов состоит из периодически повторяющихся одинаковых фрагментов-блоков, то можно ожидать, что соответствующая орбита близка к периодической. Финальную проверку можно провести с помощью численного интегрирования уравнений движения задачи N тел.

Алгоритмически легче проводить поиск периодических орбит средствами символической динамики в предельных случаях задачи N тел — например, в равнобедренной и прямолинейной задачах (см., например, работы Заре и Чесли [16], Таникавы и Микколы [17], Сайто и Таникавы [9, 10]). Эти авторы с помощью символических последовательностей устанавливают ряд общих свойств периодических орбит в этих задачах (например, прослеживают бифуркационные последовательности), а также находят начальные условия для конкретных орбит.

Несколько сложнее использовать символические последовательности в более общих случаях из-за возрастания числа степеней свободы. Тем не менее, первые шаги в этом направлении уже сделаны. Так, например, международная группа исследователей (К. Таникава, С. Миккола, А. Мюлляри) проводит таким образом поиски периодических орбит в плоской задаче трех тел равных масс с нулевыми начальными скоростями (частное сообщение).

Области устойчивости, связанные с периодическими орбитами

Еще один важный аспект исследования периодических орбит — определение их устойчивости или неустойчивости. Это довольно сложная задача, и решить ее удастся, как правило, только в частных случаях и обычно в линейном приближении. В этой связи можно отметить работу Энона [18], в которой была исследована устойчивость орбиты Шубарта [2] в прямолинейной задаче трех тел в зависимо-

сти от масс тел в линейном приближении, а также работу Капеллы и Симо [14], где изучена устойчивость орбиты «восьмерка» численно-аналитическими методами. Заметим, что в последнем случае используются методы интервальной арифметики.

Устойчивость периодических орбит можно проверять также посредством численного решения уравнений задачи N тел. Однако в этом случае можно гарантировать устойчивость системы только на ограниченном интервале времени, равном времени прослеживания эволюции системы.

Согласно КАМ-теории, в окрестности устойчивой периодической орбиты должны существовать множества траекторий с ограниченными движениями. Поиск изучения структуры подобных множеств можно выполнять путем сканирования области начальных условий (как правило, ее различных сечений) в окрестности точек, соответствующих периодическим орбитам.

В качестве примера подобной работы рассмотрим статью Мартыновой и др. [19]. Авторы рассмотрели двумерное сечение на плоскости параметров (k, φ) начальных условий, на которой лежат точки, соответствующие трем известным устойчивым периодическим орбитам в задаче трех тел (см. рис. 2). Предполагается, что в начальный момент времени все три тела располагаются на одной прямой. Здесь k — начальное значение вириального коэффициента тройной системы, φ — угол между вектором скорости центрального тела и прямой, на которой лежат тела. На рис. 10 изображены области устойчивости, связанные с тремя упомянутыми выше периодическими орбитами: а) область вблизи оси абсцисс связана с орбитой Шубарта [2]; б) область в верхней части рисунка порождена орбитой Брука [3]; в) вытянутая область в средней части рисунка связана с орбитой Мура [4].

В этой же статье [19] была обнаружена новая близкая к периодической орбита, в которой центральное тело движется вдоль кривой, имеющей форму буквы S (см. рис. 11). По сути дела, эта орбита представляет собой искривленную орбиту Шубарта с самопересечениями траекторий крайних тел. По-видимому, в точной периодической орбите крайние тела испытывают двойные соударения с центральным телом, как и в точной орбите Шубарта. Можно представить эту орбиту как «разорванную» орбиту «восьмерка».

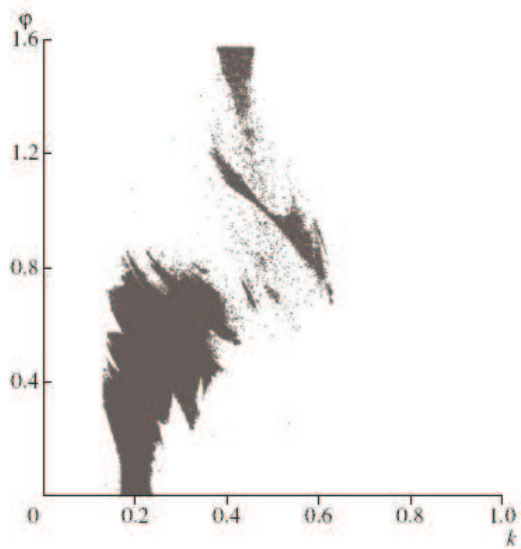


Рис. 10. Области устойчивости, связанные с тремя устойчивыми периодическими орбитами

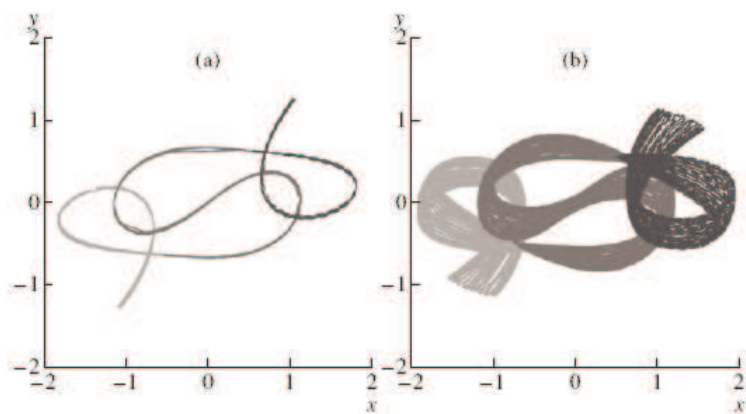


Рис. 11. Новая близкая к периодической S -орбита, обнаруженная в работе [19]: а) траектория в близкой окрестности ($k = 0.33, \varphi = 0.66$); б) траектория в более широкой окрестности ($k = 0.275, \varphi = 0.75$)

Заключение

Периодические орбиты в задаче N тел играют важную роль в формировании фазового портрета динамической системы. Устойчивые периодические орбиты окружены областями траекторий с ограниченными устойчивыми движениями. Структура этих областей может быть довольно сложной с признаками фрактальности.

В последние годы активно развивается и используется для поиска периодических орбит в задаче N тел впервые реализованный Муром [4] метод минимизации функционала действия. Этот метод оказался очень мощным и позволил построить много новых семейств периодических решений. Особый интерес вызывают периодические орбиты типа «хореографий», когда все тела движутся друг за другом вдоль одной замкнутой кривой.

Еще один перспективный подход связан с использованием методов символической динамики — периодическим орбитам соответствуют периодически повторяющиеся блоки в символических последовательностях. Этот подход только начинает развиваться, но, вероятно, имеет большие перспективы в будущем.

Работа была частично поддержана РФФИ (грант 09-02-00267-а) и Президентской программой поддержки Ведущих научных школ (проект НШ-1323.2008.2).

Список литературы

1. *Chenciner A.* A note by Poincare // Regular and Chaotic Dynamics. — 2005. — Vol. 10, iss. 2. — P. 1.
2. *Schubart J.* Numerische Aufsuchung periodischer Losungen im Dreikorperproblem // Astron. Nachr. — 1956. — Vol. 283. — P. 17.
3. *Broucke R.* On the isosceles triangle configuration in the planar general three-body problem // Astron. Astrophys. — 1979. — Vol. 73. — P. 303.
4. *Moore C.* Braids in classical dynamics // Phys. Rev. Lett. — 1993. — Vol. 70. — P. 3675.
5. *Llibre J.* On the number of central configurations in the N-body problem // Celest. Mech. Dyn. Astron. — 1991. — Vol. 50. — P. 89.
6. *Davoust E., Broucke R.* A manifold of periodic orbits in the planar general three-body problem with equal masses // Astron. Astrophys. — 1982. — Vol. 112. — P. 305.

7. *Anosova Z. P., Orlov V. V.* The types of motion in hierarchical and non-hierarchical triple systems: numerical experiments // *Astron. Astrophys.* — 1992. — Vol. 260. — P. 473.
8. *Hadjidemetriou J. D.* The existence of families of periodic orbits in the N-body problem // *Celest. Mech.* — 1977. — Vol. 16. — P. 61.
9. *Saito M. M., Tanikawa K.* The rectilinear three-body problem using symbol sequence II: role of the periodic orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 2009. — Vol. 103. — P. 191.
10. *Sekiguchi M., Tanikawa K.* On the symmetric collinear four-body problem // *Publ. Astron. Soc. Japan.* — 2004. — Vol. 56. — P. 235.
11. *Orlov V. V., Petrova A. V., Martynova A. I.* Classification of orbits in the plane isosceles three-body problem // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 333. — P. 495.
12. *Vanderbei R. J.* New orbits for the n-body problem // *Annals of the New York Academy of Sciences.* — 2004. — Vol. 1017. — P. 422.
13. *Terrachini S.* On the variational approach to the periodic n-body problem.
14. *Kapela T., Simo C.* Computer assisted proofs for nonsymmetric planar choreographies and for stability of the Eight // *Nonlinearity.* — 2007. — Vol. 20. — P. 1241.
15. *Titov V.* Symmetrical periodic orbits in the three-body problem - the variational approach // *Annales Universitatis Turkuensis.* — 2006. — Vol. 358. — P. 9.
16. *Zare K., Chesley S.* Order and chaos in the planar isosceles three-body problem // *Chaos.* — 1998. — Vol. 8. — P. 475.
17. *Tanikawa K., Mikkola S.* One-dimensional three-body problem via symbolic dynamics // *Chaos.* — 2000. — Vol. 10. — P. 649.
18. *Henon M.* Stability of interplay motions // *Celest. Mech.* — 1977. — Vol. 15. — P. 243.
19. *Martynova A. I., Orlov V. V., Rubinov A. V.* The structure of non-hierarchical triple system stability regions // *Astron. Rep.* — 2009. — Vol. 53. — P. 710.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ НОВЫХ КОУРОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ — ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ

В работе рассмотрены возможности проведения фотометрических наблюдений на новых телескопах Коуровской астрономической обсерватории — 2×40 см робот-телескопе МАСТЕР и 1.2-метровом телескопе — и возникающие при этом проблемы.

In work requirements which are put before astroorientation systems (star gauges) new generation are considered. The most important of them is the very high precision of orientation — $0.1-0.01''$ — on high speed of updating of the information. Possible ways of achievement similar precision are considered.

In the article are considered possibility and problems of photometrical observations on the new telescopes of Kourovka astronomical observatory: 2×40 cm MASTER robot-telescope and 1.2-meter telescope.

В 2008–2009 гг. в Коуровской астрономической обсерватории были установлены два новых телескопа: сдвоенный 40-см робот-телескоп МАСТЕР и 120-см «Метровик».

Ниже, в табл. 1 и 2 приведены характеристики инструментов и установленных или предполагающихся к установке на них приборов, предоставленные В. В. Крушинским.

Следует заметить, что в отличие от других телескопов, установленных или стоявших ранее в Коуровской астрономической обсерватории оба новых инструмента являются широкопольными, поэтому методика проведения фотометрических измерений звезд на них будет существенно отличаться от классической.

В классической электрофотометрии, использовались фотометры различной конструкции.

1. Одноканальные и однополосные, позволяющие измерять один объект в одном фильтре, например, фотоэлектрический фотометр Лютого [1].

Таблица 1. Характеристики телескопа МАСТЕР Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	Значение
Число труб	2
Диаметр	400 мм
Фокусное расстояние	1 000 мм
Поле зрения	$2 \times 2^\circ$
Камера	Apogee Alta U16m
ПЗС	Kodak KAF-16803
тип ПЗС	с прямой засветкой
Размер ПЗС	4096×4096 пикс.
Размер пикселя	9 мкм
Квантовая эффективность (на 5500 Å)	60 %
Шум считывания (на 4 МГц)	$9 e^-$
Темновой сигнал (при T=25C)	$3 e^-/\text{пикс}/\text{с}$
Светофильтры	BVR+поляриз. и VRI+поляриз.
Дополнительно	Сверхбыстрая автоматическая монтажная

- Одноканальные многополосные, в которых один объект одновременно измерялся в нескольких фотометрических полосах. Примеры таких приборов — электрофотометр Корнилова [2].
- Многоканальные фотометры, например, спецфотометр Магницкого, позволявшие одновременно измерять несколько объектов [3].

Преимущество приборов первого типа заключалось в том, что свет всегда проходил через один и тот же оптический тракт. Недостатком — что все наблюдения производились разновременно. В многоцветных одноканальных приборах оптические тракты частично различались, в многоканальных — были разделены полностью. Следует заметить, что возможность одновременного измерения объектов существенно повышала точность измерений: типичная погрешность относительных измерений на приборе Лютого составляла 0.02^m , на 4-цветном фотометре Корнилова — 0.003^m , а на двухканальном спецфотометре Магницкого (при включенной системе термостабилизации)

Таблица 2. Характеристики нового метрового телескопа Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	Значение
Диаметр	1 200 мм
Фокус (главный)	3 500 мм
Фокус (Нэсмита)	11 600 мм
Поле зрения (гл. фокус)	1.15°
Поле зрения (Нэсмит)	0.5°
Камера	Apogee Alta U230
ПЗС	e2v CCD230-42
тип ПЗС	с обратной засветкой
Размер ПЗС	2 048 × 2 048 пикс.
Размер пикселя	15 мкм
Макс. квантовая эффективность (на 7 200 Å)	96 %
Охлаждение	Пельтье
Шум считывания	12 e^-
Темновой сигнал (при T=-25C)	0.4 e^- /пикс/с
Светофильтры	UBVRI+узкополосные

ции) — 0.001^m. Следует заметить, что механико-оптические системы, позволявшие проводить одновременные наблюдения двух или нескольких звезд были сложны как по устройству, так и в эксплуатации и применялись крайне редко.

Фотометрические измерения носили относительный характер, т. е. определялась разность звездных величин измеряемых звезд и звезд сравнения. В процедуре измерения участвовали три группы звезд — в минимальном случае — три звезды:

- измеряемая звезда;
- основная звезда сравнения;
- контрольная звезда сравнения.

Звезды сравнения должны быть постоянными и быть предварительно привязанными к фотометрическим звездам-стандартам.

Измерения заключались в попеременном измерении этих звезд и фона рядом с ними: изменения блеска основной и контрольной опорных звезд позволяют определить погрешность измерения блеска непременных звезд в данной серии, а разность отсчетов основ-

ной опорной и измеряемой звезды используется для оценки блеска последней. Для получения точных результатов все три звезды, участвующие в измерениях должны примерно одинакового блеска. А для уверенного определения атмосферной экстинкции и перевода результатов в стандартную фотометрическую системы — дополнительно иметь близкие показатели цвета. Порядок измерения перечисленных звезд и соотношение числа измерений каждой зависит от цели проведения эти измерений и варьировался в широких пределах.

Измерение каждой звезды состоит в наведении диафрагмы фотометра на центр изображения звезды и удержания ее там в ходе проведения экспозиции. Измерение одной звезды оказывается крайне непроизводительным¹, поэтому обычно составлялся список измеряемых объектов, который был существенно больше, чем список стандартов и контрольных звезд. На одно измерение стандарта приходилось несколько (много) измерений изучаемых звезд.

Типичный пример порядка измерения нескольких звезд на многополосном фотометре выглядел так [4]:

```
Опорная[UBVR] Опорная -> Фон у опорной -> Звезда ->
-> Звезда -> Фон у звезды -> Опорная -> Опорная ->
-> Звезда -> Звезда -> Опорная -> Опорная ->
-> Фон у опорной -> Контрольная -> Контрольная
```

Для ускорения работы и повышения точности измерений желательно было, чтобы измеряемая звезда и стандарт располагались близко друг от друга, желательно внутри поля зрения телескопа. Однако выполнить это требование удавалось не всегда.

Поскольку серии наблюдений длились достаточно долго, то высота звезд над горизонтом менялась, что приводило к изменению атмосферного поглощения. Обязательным шагом обработки таких фотометрических серий был вынос измерений всех звезд за атмосферу. В оптимальном варианте вынос за атмосферу осуществлялся методом Никонова (методу контрольных звезд, см., например, [5]). В случае отсутствия необходимой информации ход экстинкции мог определяться иначе: по данным с другого телескопа обсерватории в эту же ночь, по среднесезонным значения для данного места или по формуле Бугера со средними коэффициентами.

Еще более осложнялась ситуация если фотометр был однополосным, в этом случае в программе наблюдений приходилось задавать

¹Если только наблюдения не были посвящены изучению именно этой одной звезды.

не только последовательность перехода от звезды к звезде, но и последовательность смены светофильтров.

С появлением ПЗС-приемников ситуация существенно изменилась — все объекты и фон в поле зрения телескопа стали измеряться одновременно (правда только в одной спектральной полосе). Для инструментов с малыми полями зрения дифференциальные изменения поглощения в атмосфере были невелики и их легко было учесть¹.

Резко выросли как число производимых измерений, так и их качество — по словам наблюдателей из КраО «число «фотометрических» ночей с переходом на ПЗС выросло на порядок» (хотя эта оценка кажется несколько завышенной).

Рассмотрим теперь ситуацию с новыми широкопольными инструментами установленными в Коуровской астрономической обсерватории. Телескоп МАСТЕР с апертурой 40 см может заниматься только фотометрией и астрометрией. На «метровике» помимо этих работ возможна также спектрофотометрия ярчайших объектов — надо признать, что этот инструмент мал для серьезных спектральных исследований.

Очень важными как для фотометрических, так и для астрометрических измерений на новых Коуровских телескопах являются угловые размеры изображений звезд, которые приведены в табл. 3 (данные для «метровика» приведены для главного фокуса).

Из табл. 3 видно, что дифракционные размеры изображений пренебрежимо малы (около 0.1 пикселя), турбулентный диск на МАСТЕРЕ совпадает по размеру с пикселем, а на «метровике» составляет примерно 2 пикселя.

Продолжим дальнейшее рассмотрение с телескопа-робота МАСТЕР. На сегодняшний день сеть этих телескопов состоит из четырех близких по характеристикам инструментов. Они установлены под Москвой (Домодедово), в Коуровке, на Кисловодской корональной станции Пулковской обсерватории (в последствии будет перенесен на КГО ГАИШ) и в Иркутске. Телескопы МАСТЕР отрабатывают алерты, приходящие от орбитальных гамма-телескопов. Их конструкция позволяет им за секунды навестись на любую (указанную в сообщении) точку неба и начать съемку. Однако такие события происходят примерно раз в сутки, остальное время инструменты МАСТЕР ведут наблюдения по фоновой программе. Опыт эксплуатации первого МАСТЕРа (под Москвой) насчитывает уже несколько лет.

¹Или проигнорировать из-за их малости.

Таблица 3. Угловые размеры изображений в новых телескопах Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	МАСТЕР	«Метровик»
Фокусное расстояние телескопа, м	1.0	3.5
Линейный размер пикселя, мкм	9	15
Угловой размер пикселя, "	1.9	0.9
Тип ПЗС	с прямой засветкой	с обратной засветкой
Дифракционное изображение (для $\lambda = 5500 \text{ \AA}$), "	0.3	0.08
Дифракционное изображение (для $\lambda = 5500 \text{ \AA}$), пикс	0.16	0.09
Турбулентный диск звезды ¹ , "	2	2
Турбулентный диск звезды, пикс	~1	~2

¹Мы не имеем точных данных о размерах турбулентных изображений звезд в Коуровской астрономической обсерватории поэтому взяли значение типичное для равнинных обсерваторий.

Потенциальный объем астрономической информации, который можно получить от обработки этих кадров, очень велик, достаточно упомянуть хотя бы наблюдения переменных звезд. Однако на сегодня для телескопов МАСТЕР хорошо отработаны методики выявления новых (отсутствующих на предыдущих снимках) и движущихся (смещающихся) объектов, а также объектов с сильным изменением блеска. Таким образом удастся обнаруживать искусственные спутники Земли, астероиды, новые и сверхновые звезды. Возможности исследования других объектов ограничиваются точностью получаемой фотометрии.

Причем точность фотометрии ограничивается следующими причинами: а) плохим астроклиматом Коуровской обсерватории, б) субпиксельным характером фотографии.

Робот-телескопы, к которым относится МАСТЕР, ведут наблюдения при любом состоянии атмосферы, даже в тех, которые обычно считаются непригодными для фотометрии. Способом, который может улучшить данную ситуацию, является наблюдение звезд по опорному каталогу, т. е. по крайней мере часть звезд каждого кадра должны отождествляться с некоторым опорным каталогом для сравнения и анализа каталожных и измеренных звездных величин.

Какие каталоги можно использовать в качестве опорных? Телескоп мастер в стандартном режиме работы регистрирует звезды приблизительно до 19 величины. Поскольку телескопы Коуровской обсерватории будут наблюдать ВСЕ объекты северного неба, то в качестве опорных могли бы использоваться следующие каталоги:

- Алма-Атинский WBVR-каталог звезд северного неба ГАИШ [6, 7];
- каталог Tycho-2 [8];
- каталоги USNO B1.0 [9];
- Sloan digital sky survey (SDSS) [10].
- Two-micron all-sky survey (2MASS) [11];

Алма-Атинский каталог ГАИШ содержит около 11 000 объектов северного неба измеренных в фотометрической системе WBVR. Примерно 8 000 из них измерены с точность около 0.003^m . Все эти объекты расположены на северном небе ($\delta > -30^\circ$). Каталог Tycho-2, полученный в ходе космического астрометрического обзора Hipparcos, содержит около 2.5 млн звезд примерно до 11^m в двух спектральных полосах B_T и V_T . Точность фотометрии звезды до 9^m в нем составляет 0.001^m . Таких объектов около 300 000. Если использовать эти каталоги в качестве опорных, то в поле зрения телескопа МАСТЕР будет попадать в среднем 1 звезда Алма-Атинского каталога, 50 звезд каталога Tycho-2 и 6 звезд из его высокоточной части. Этого достаточно для оценки атмосферной экстинкции, в том числе и дифференциальной, при «идеальном» фотометрическом состоянии атмосферы.

Три последних каталога гораздо более многочисленны, сопоставление кадра с ними позволяет получить оценки блеска для всех наблюдаемых объектов. Каталог USNO B1.0 содержит данные о 3 643 201 733 объектах. Однако этот каталог получен в результате оцифровки фотопластинок Паломарского обзора неба, он обладает хорошей астрометрической точностью, но погрешность блеска звезд в нем слишком велика — порядка 0.1^m , т. е. его нельзя использовать в качестве опорного для фотометрических наблюдений.

Каталог SDSS содержит фотометрические измерения в пяти оптических полосах u , g , r , i и z до $23-25^m$ примерно на одном стере радиане небесной сферы вокруг северного полюса Галактики. Распространение обзора на остальное небо пока не предполагается. Этот каталог позволяет отождествлять все звезды в кадре МАСТЕРа и

даже «метровика», но не на всем небе. Наиболее удачный период для проведения фотометрии по SDSS в Коуровке — весна-лето. Еще одним недостатком этого каталога (помимо неполноты покрытия неба) является плохая поддержка фотометрической системы: вынос фотометрических измерений за атмосферу в SDSS осуществлялся по простейшим формулам, что приводит к заметным систематическим ошибкам.

2MASS — Two-Micron All-Sky Survey — содержит измерения примерно 300 000 000 звезд в трех полосах J, H и K_s ближнего инфракрасного диапазона (1–2 мкм). Предельные звездные величины в этих полосах составляют: $J_{\max} = 15.8$, $H_{\max} = 15.1$ и $K_{s,\max} = 14.3$. Учитывая, что большинство звезд в полосах J, H и K_s несколько ярче, чем в оптике, получаем, что по каталогу 2MASS можно отождествить около 1 % звезд в кадре телескопа МАСТЕР.

Для пересчета в полосы BVRI, в которых ведутся наблюдения на МАСТЕРЕ, необходимо определить спектральный класс звезды. Двухцветная диаграмма J–H/J– K_s вполне позволяет это сделать [12]. Некоторая проблема такого пересчета заключается в том, что теоретическая двухцветная диаграмма для карликов и гигантов дает заметно различающиеся предсказания. Для звезд спектрального класса позже K это определение является однозначным, так как зависимости расходятся, для звезд моложе A — зависимости практически совпадают. В оставшемся интервале ход двухцветной диаграммы совпадает, но одна и та же точка на ней соответствует разным спектральным классам (и соответственно звездным величинам в BVRI) для гигантов или карликов.

Следует заметить, что обзор неба в SDSS делался в один проход (на большей части неба, охваченной обзором), а 2MASS — в два, таким образом эти обзоры не позволяют выделить переменные звезды, для которых будет не менее 10 %.

Алгоритм наблюдений с опорным каталогом должен выглядеть так.

- На основе SDSS (вокруг северного полюса Галактики) и 2MASS (для остальной части северного неба) создается начальная версия опорного каталога звезд в полосах BVRI. Для BVRI-величин рассчитанных по 2MASS в каталог заносятся два варианта: для гигантов и карликов.
- Этот каталог корректируется по результатам первых наблюдений.

- В нем выделяются переменные звезды.
- Выбирается вариант карлик/гигант (для спектральных классов A—G по 2MASS).
- По последующим наблюдениям производится уточнение звездных величин непериодических звезд в каталоге.

В равнинной обсерватории, подобной Коуровской, большую часть времени можно предполагать наличие легкой облачности с уровнем поглощения $\sim 1\text{--}5\%$ и размерами неоднородности в десятки угловых минут. Использование опорного каталога позволяет для каждого кадра построить карту поглощения и учитывать ее при обработке. Для этого в каждом отдельном наблюдении необходимо провести следующие действия:

- отождествить изображения звезд в кадре с каталогом;
- найти разности измеренных и опорных звездных величин;
- исключить из списка переменные звезды;
- по оставшимся непериодическим звездам построить локальную карту поглощения.

На этапе начальной корректировки, когда мы не знаем какие из звезд являются переменными, необходимо производить несколько последовательных снимков одной и той же области неба для того, чтобы разделить влияние меняющегося от кадра к кадру атмосферного поглощения и постоянного для серии кадров изменения связанного с переменностью звезд.

Все выше сказанное относится как к МАСТЕРу, так и к «метровику». Для последнего неоднородность атмосферного поглощения не менее важна из-за существенно более высокой точности фотометрии, которая на нем может быть получена. Опорные каталоги у двух телескопов могут быть общими.

Другая причина низкой точности фотометрии МАСТЕРа связана с установленной на нем ПЗС-матрицей. Это матрица с прямой засветкой, т. е. регистрируемое излучение сначала проходит через полупрозрачные управляющие электроды и лишь затем попадает в область регистрации. Из-за этого возникает неустраняемая неоднородность чувствительности внутри пикселей, составляющая десятки процентов. При размере изображений звезд примерно равных пикселю это будет приводить к заметным ошибкам в фотометрии и астрометрии.

Эта проблема может быть решена одним из следующих способов.

1. Расфокусировка изображения. Если расфокусировать изображение до двух пикселей влияние внутрипиксельной неоднородности чувствительности существенно снизится. Уровень остаточной неоднородности плохо поддается теоретической оценке, но может быть легко измерен в специальной серии наблюдений. недостатком этого метода является увеличение шумов. При расфокусировке до двух пикселей площадь изображения (и, следовательно, суммарный шум) увеличивается в четыре раза, отношение сигнал/шум — падает в два раза, а проникающая сила телескопа снижается примерно на одну звездную величину.

2. Регистрация изображений в режиме ВЗН. Режим с *временной задержкой и накоплением* состоит в следующем: с помощью гидирующего механизма изображение заставляют двигаться вдоль столбцов ПЗС-матрицы. Одновременно в том же направлении и с той же скоростью переносятся накопленные в ПЗС заряды. Такой режим регистрации приводит к усреднению влияния неоднородности. Перенос заряда за время экспозиции на 100 пикселей приведен к снижению неоднородности чувствительности¹ на порядок. Этот способ не приводит к снижению проникающей способности инструмента, но, возможно, потребует переделки контроллера, управляющего ПЗС-камерой.

Для «метрового» телескопа, оснащенного ПЗС-матрицей с обратной засветкой и более крупным зерном переход на ВЗН-режим регистрации для высокоточных фото- и астрометрических измерений не требуется (хотя и возможен).

Работа частично поддержана грантами РФФИ 09-02-00032 и 09-02-00520.

Список литературы

1. *Лютый В. М.* Автоматрический электрофотометр со счетом фотонов // Сообщ. ГАИШ. — 1971. — Т. 172. — С. 30—41.
2. *Корнилов В. Г., Крылов А. В.* Четырехканальный звездный фотоэлектрический фотометри для наблюдений ярких звезд // Астрон. журн. — 1990. — Т. 67. — С. 173—181.

¹Снижается влияние как внутри- так и межпиксельной неоднородности чувствительности.

3. *Магницкий А. К.* Наблюдения звезды скопления Плеяды HZ:II-625 V811-TAURI с использованием синхронизированного двухзвездного UBVR фотометра // *Астрон. журн.* — 1987. — Т. 31. — С. 696.
4. *Миронов А. В.* Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. — М.: ТОО «Эдэм», 1997. — С. 157. — (Учебное пособие).
5. *Миронов А. В.* Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — С. 260.
6. *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. е.* Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба // *Сообщ. ГАИШ.* — 1991. — Т. 63. — С. 3—400.
7. *Cherepashchuk A., Khaliullin K., Kornilov V., Mironov A.* Sternberg WBVR photometric survey of bright stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 217. — P. 83.
8. *Hog E., Fabricius C., Makarov V. V. e.* Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 255. — P. L27—L30.
9. *Monet D. G., Levine S. E., Casian B. e.* The USNO-B1.0 Catalog // *Astron. J.* — 2003. — Vol. 125. — P. 984.
10. *Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., Allam S. S. e.* The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 172. — P. 634.
11. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. e.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163.
12. Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release. — <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/second/doc/figures/>.

МЕДЛЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Все больше наблюдательных и теоретических аргументов за то, что галактики продолжают изменять свою структуру и морфологию всю жизнь. Даже общий тип галактики — спиральная или эллиптическая, с баром или без бара — не дается от рождения навсегда, а может изменяться. Изменения могут происходить как под действием внутренних механизмов, заложенных в самой природе компонент галактик, в первую очередь, дисков, так и под действием внешних факторов — гравитационных и газодинамических взаимодействий с другими галактиками и с межгалактической средой. Изменения на шкале нескольких миллиардов лет получили название «вековой» или «секулярной» эволюции.

More and more arguments and evidences favour the picture where galaxies continue to change their structure and morphology during all the life. Even the general morphological type — elliptical or spiral, barred or unbarred — is not fixed for ever, it can change dramatically. The transformations can be provoked either by internal mechanisms appropriate for the cold dynamical components of a galaxy, for the disks first of all, or by external perturbations — namely, by gravitational or gasdynamical interaction with other galaxies and with intergalactic medium. The slow transformation with a timescale of a few Gyrs is now called “secular evolution” of galaxies.

Что такое «секулярная эволюция» галактик

На рис. 1 замечательно отклассифицированы все механизмы эволюции галактик, которые только можно себе вообразить на настоящий момент. По углам квадрата разнесены механизмы внешние —

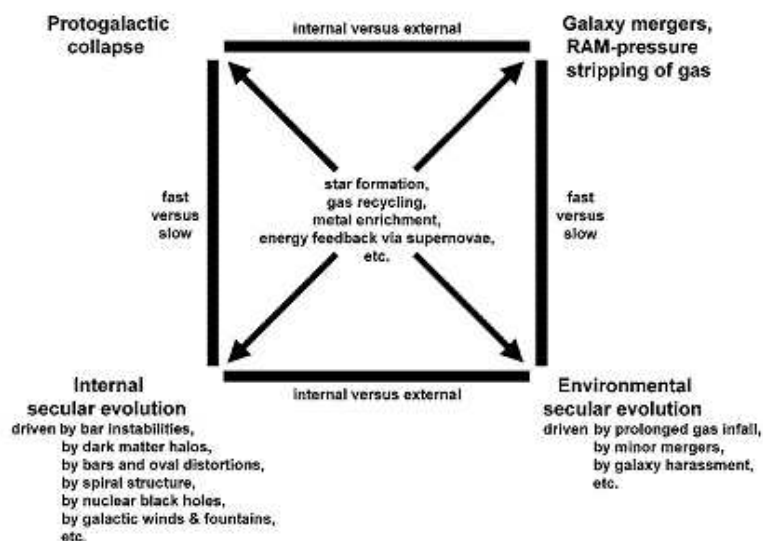


Рис. 1. Диаграмма из обзора Kormendy & Kennicutt (2004) [1], классифицирующая механизмы эволюции галактик по двум признакам: внешняя — внутренняя и быстрая — медленная. «Секулярная» эволюция — это эволюция медленная; она может быть как внешней, так и внутренней

внутренние и быстрые — медленные. Например, «монолитный» коллапс протогалактического газового облака — это внутренний быстрый процесс. Внутренний — потому что может происходить в отсутствие соседей, облаку не нужна посторонняя помощь, чтобы сколлапсировать под действием гравитации; а быстрый — потому что происходит на динамической шкале времени: для облака массой 10^{11} масс Солнца это время будет чуть меньше 1 млрд лет. Если же характерные времена растягиваются на несколько миллиардов лет, то такие процессы уже считаются медленными и с легкой руки классиков (см. обзор [1]) называются на английском языке «секулярными». На схемке рис. 1 перечислены все мыслимые варианты таких процес-

сов. Они могут быть опять же «внутренними», не требующими помощи извне — это барные неустойчивости холодных звездных дисков, спиральные ветви, триаксиальные вращающиеся гало, центральные черные дыры, галактические фонтаны, — а могут провоцироваться взаимодействием — либо гравитационным, с другим массивным телом (галактикой, группой или скоплением галактик), либо газодинамическим, если на галактику падает извне холодная газовая струя или ее «обжимает» плотная горячая межгалактическая среда. Интересно, что многие механизмы секулярной эволюции, обладая независимым происхождением, тем не менее действуют через один и тот же проводник эволюции — через генерацию бара в диске, или в более общих словах, через неосесимметричное возмущение потенциала. Бар возникает как в изолированных галактических дисках, под действием собственных динамических неустойчивостей холодных в динамическом смысле дисков, так и в результате взаимодействия с другими галактиками и даже в результате слияний — просто потому, что гравитационное воздействие извне всегда «приходит» с какой-то одной стороны и таким образом нарушает центральную или осевую симметрию потенциала галактического диска.

Бар — универсальный механизм, управляющий эволюцией галактик

Признанным ведущим механизмом динамической эволюции дисков галактик на временных масштабах порядка миллиардов лет является «неосесимметричное возмущение», а проще говоря — бар. Если во времена Хаббла и несколько позже считалось, что бар есть атрибут индивидуальной галактики, данный ей раз и навсегда, признак морфологического типа, то теперь возобладала точка зрения на бар как на транзиентную структуру. Сейчас теоретически доказано, что бары в галактиках могут быть временными структурами: они могут возникать и исчезать на масштабах немногих миллиардов лет. Причем они могут возникать как сами собой, если исходный диск неустойчив к барообразующей моде возмущений, так и под действием внешнего гравитационного возмущения, если рядом что-то пролетело. Как показал Ногучи [2], рассчитавший методом N тел численную динамическую модель чисто звездного диска, подвергнутого гравитационному возмущению малым спутником, пролетевшим мимо, этот механизм крайне эффективен даже в присутствии стабилизирующего сферического темного гало.

В модели швейцарцев Фенигера и Фридли [3] тоже считалась численно задача N тел для чисто звездного диска, но только для диска изолированного. Начальными условиями были осесимметричное распределение частиц, изотропная дисперсия их скоростей, от 30 км/с на $R = 15$ кпк до 170 км/с в центре, и профиль плотности, представлявший собой два вложенных друг в друга диска Miyamoto—Nagai, чтобы учесть в центре галактики гравитацию балджа. Такую «динамически холодную», плоскую, вращающуюся звездную конфигурацию оставляли в покое, и через 3×10^8 — 4×10^8 лет в ней сам собой развивался бар, вполне устойчивый во времени, а также транзитные спиральные рукава. По бару и рукавам шла перекачка момента вращения наружу, так, что к концу счета суммарный угловой момент звезд внутри радиуса коротации бара уменьшился на 44 %. Соответственно, шла и радиальная перестройка структуры диска: только за счет действия сил гравитации бар за 5 млрд лет сформировал за своими пределами, на $R > R_{cor}$, чисто экспоненциальный профиль поверхностной плотности звезд, что представлялось несомненным успехом модели в плане сравнения с наблюдениями. Дисперсия скоростей звезд со временем росла на всех расстояниях от центра (диск «грелся») и становилась анизотропной, $\sigma_R > \sigma_\phi > \sigma_z > \sigma_0$.

Начальные условия модели Фридли и Бенца [4] напоминают начальные условия модели Фенигера и Фридли [3], только добавлен газ — 10% от массы звезд. С газовыми облаками Фридли и Бенц обращаются, почти как со звездами: и то, и другое в задаче N тел — «частицы» массой около миллиона солнечных масс («облака»). Однако, в отличие от бесстолкновительных звезд, диссипативная природа газа запрещает ему находиться на орбитах с петлями и на взаимнопересекающихся орбитах — если в модели часть газа на такие орбиты выскакивает, его немедленно «тормозят», и диагностируют возникновение ударной волны, где происходит диссипация, т. е. где газ теряет энергию. В модели считается, что выделенная в ударной волне энергия немедленно высвечивается, и таким образом газ искусственно поддерживается в изотермическом состоянии. Совместное рассмотрение газа и звезд, диссипативной и бездиссипативной компонент, имеет, однако, принципиальное значение. Газ и звезды взаимодействуют динамически, и это приводит к кардинально новым эффектам. Так, если в чисто звездной системе, у Фенигера и Фридли [3], угловой момент мог перераспределяться между звездами посредством бара и спиральных рукавов, то в модели у Фридли и Бенца [4] газ момент теряет — он отдает его звездам. Это приводит к тому, что

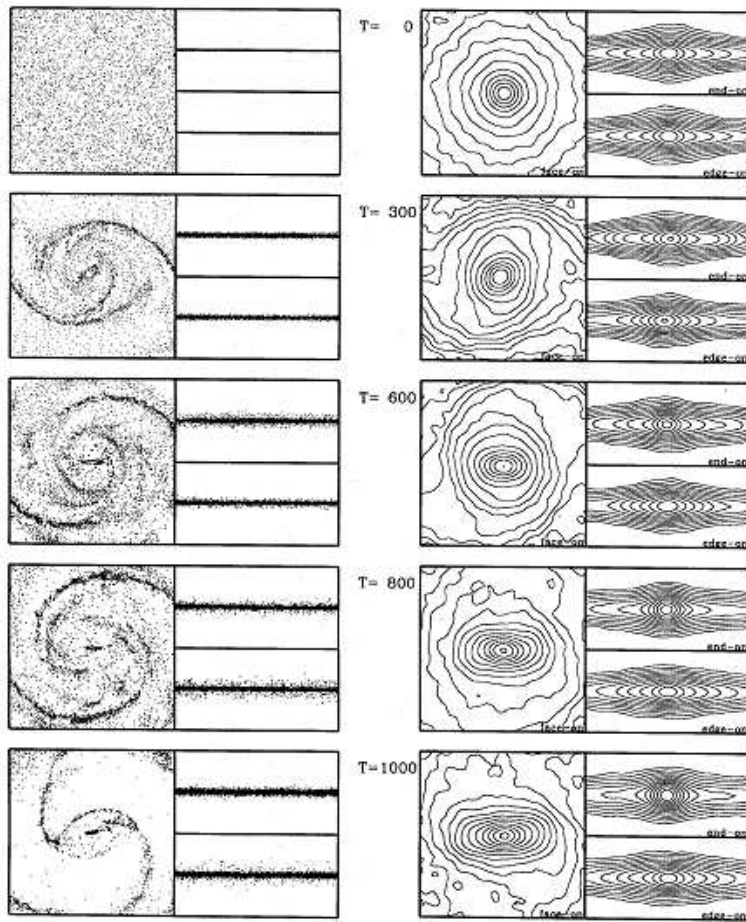


Рис. 2. Численно рассчитанная эволюция распределения плотности в диске изолированной галактики под действием внутренних неустойчивостей (Фридли и Бенц 1993 [4]): слева — газ, справа — звезды

газ эффективно стекает в центр, в область радиусом ~ 1 кпк, полностью освобождая от себя область диска, содержащую бар. Численный эксперимент Фридли и Бенца показал, что за ~ 1 млрд лет в центре собирается $\sim 3 \times 10^9 M_{\odot}$ газа, а темп радиальной аккреции на короткой шкале может достигать $100 M_{\odot}$ в год — этого вполне

достаточно, чтобы «напитать» активное ядро или мощную ядерную вспышку звездообразования.

Однако такая заметная концентрация массы в ядре может иметь катастрофические последствия для самого бара. Эту конкретную задачу — что будет со звездным баром, если в центре вдруг появится компактный массивный объект — первыми посчитали в трехмерном численном эксперименте Норман и др. [5]. Оказалось, что как только центральная концентрация массы достигает 5 % от полной массы диска, бар исчезает, «рассасывается». Вместо него остается квазисфероидальное звездное образование, почти осесимметричное в проекции на плоскость диска и толстое по z -координате — т. е. балдж. Норман и др. [5] нарисовали линии равной плотности при взгляде на галактику с ребра; изоденсы оказались вовсе не прямоугольными, как обычно бывает у баров с ребра, а почти эллипсоидальными, с небольшой «дисковостью» в направлении, перпендикулярном плоскости вращения. И вращается этот балдж теперь не цилиндрически, как вращаются толстые бары, а с убыванием угловой скорости вращения по z -координате. То есть по всем признакам эта новорожденная звездная структура — обычный балдж, правда, небольшой. Имеет ли этот результат прямое отношение к оценке времени жизни бара в обычной спиральной галактике? Критики долгое время упирали на невозможность собрать за несколько миллиардов лет такое «тяжелое» ядро и полностью уничтожить бар (напомним, что масса центральной черной дыры — всего 0.1 % от общей массы галактики). Однако недавнее более комплексное рассмотрение проблемы Бурно и др. [6] показало, что если учесть не только образование центральной конденсации массы, но и перекачку момента от аккрецирующего газа к звездному бару, и гравитационные крутящие моменты от бара, то действительно, бар в спиральной галактике, богатой газом, «рассасывается» за 1–2 млрд лет. Бары реально получают транзитными структурами, и чтобы их было в природе так много, как наблюдается (больше 70 % всех близких дисковых галактик имеют бары, [7]), они должны постоянно возобновляться — теми самыми механизмами, о которых шла речь выше, т. е. внутренней или внешней секулярной эволюцией.

Во второй статье своей серии про самосогласованное трехмерное моделирование эволюции звездно-газового диска Фридли и Бенц [8] ввели в расчет процесс звездообразования. Точной количественной теории звездообразования пока не существует, даже на концептуальном уровне высказываются разные мнения, поэтому вторая мо-

дель Фридли и Бенца имеет гораздо больше свободных параметров, чем первая, и ее результаты следует рассматривать только как качественные. Но и на качественном уровне здесь много интересного. Понятно, что когда газ стекает в центр и там уплотняется, в самых плотных местах должно вспыхнуть звездообразование. Расчеты показали, что в молодых барах, с возрастом меньше 0.5 млрд лет, области звездообразования концентрируются к большой оси бара, и темпы звездообразования — весьма умеренные. Но затем, когда динамические процессы разовьются и приведут к существенному радиальному перераспределению газа, куда более мощные вспышки звездообразования стартуют в ядре и в околоядерном кольце вблизи области внутреннего Линдбладовского резонанса. Молодые звезды, образовавшиеся из газа в центре галактики, имеют меньшую вертикальную дисперсию скоростей, чем старые звезды, и потому они особенно подвержены действию вертикальных неустойчивостей околобарных орбит. Именно молодые звезды «выталкиваются» из плоскости диска «умирающим» баром, именно из них образуется балдж. Так что предсказание гипотезы формирования балджей в ходе секулярной эволюции звездно-газового диска — это то, что звезды в них должны быть в среднем моложе, чем в прилегающих внутренних областях диска.

Откуда берутся экспоненциальные звездные диски?

С тех пор, как Фриман [9] в своей классической работе провозгласил наблюдаемые профили поверхностной яркости крупномасштабных дисков спиральных и линзовидных галактик универсальными и экспоненциальными по форме, долгое время этот результат не подвергался сомнению, и любая поверхностная фотометрия обязательно включала в себя вписывание экспоненциального закона в профиль поверхностной яркости внешних частей галактики — ее диска. Однако в последние годы, когда накопился наблюдательный материал по очень глубоким изображениям близких галактик, позволяющий проводить измерения поверхностной яркости до 27-й зв. величины с квадратной секунды, пришлось все-таки эту парадигму немного пересмотреть. Сначала Эрвин [10] по полной выборке галактик ранних типов с барами, SB0—SBb, 66 объектов, а потом Похлен и Трухильо [11] по выборке галактик поздних типов, Sb—Sd, попавших в обзор SDSS, 98 объектов, обнаружили, что галактик с чисто экспо-

ненциальными дисками — абсолютное меньшинство: не более 30 % в выборке галактик с барами, и около 10 %, если брать все галактики подряд. Другие типы распределения поверхностной яркости — галактики с обрывом диска (40—60 %), когда профиль яркости хорошо описывается двумя экспонентами с более крутой внешней, и галактики с двухярусными экспоненциальными дисками, когда профиль яркости хорошо описывается двумя экспоненциальными кусками с более пологим внешним (25—30 %). Согласно [11], последний тип распределения яркости более характерен для ранних типов спиральных галактик — не позднее Sb—Sbc. Я предполагаю, что явление кусочно-экспоненциальных глобальных звездных дисков есть как раз яркое проявление секулярной эволюции спиральных галактик, спровоцированной внешним воздействием в случае двухярусных дисков и внутренними неустойчивостями — в случае дисков чисто экспоненциальных. Что касается дисков обрезанных, то для них вполне вероятно бегущая волна звездообразования от центра галактики к краю. В недавней работе той же команды [12] для выборки галактик с обрезанными дисками сделан переход от профилей поверхностной яркости к профилям поверхностной плотности — через отношения массы к светимости звездного населения, оцененными по цвету. Оказалось, что обрезанные в поверхностной яркости диски превращаются в чисто экспоненциальные, если перейти к поверхностной плотности, — во внешних областях звезды моложе и беднее металлами, и потому они выглядят ярче при той же массе. Интересно, что двухярусные профили в тех галактиках, где они были обнаружены по данным поверхностной фотометрии, остаются двухярусными даже после перехода к поверхностной плотности.

Как показывает теоретическое рассмотрение, экспоненциальный по форме профиль поверхностной плотности звезд — из которого потом можно «кусками» набрать как чисто экспоненциальные, так и двухярусные диски — можно построить механизмами секулярной эволюции, медленно перераспределяя вещество вдоль радиуса диска галактики.

Нельзя не упомянуть изящную аналитическую работу Лина и Прингла [14], где экспоненциальный профиль плотности звезд со временем получался из начально постоянной по радиусу плотности газа на основе самых общих физических соображений. Лин и Прингл предположили, что характерный временной масштаб превращения газа в звезды — того же порядка, что и характерное вязкое время в газе диска. И тогда за 12 млрд лет из любого распределения газа по-

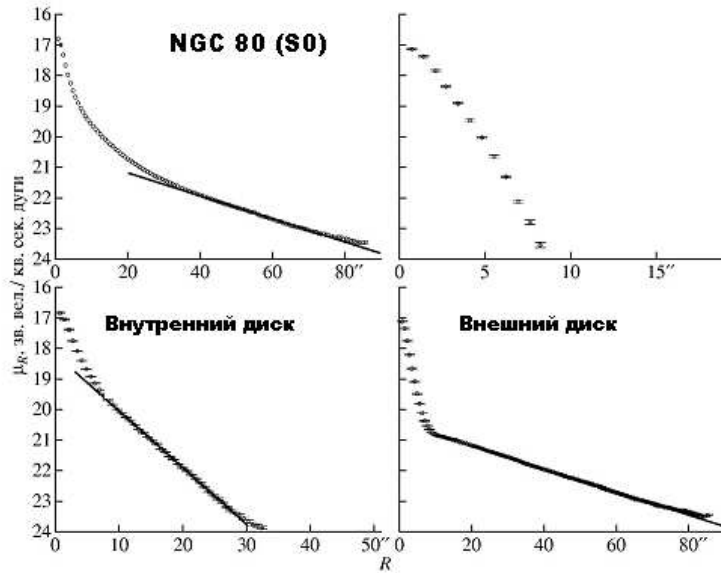


Рис. 3. Разделение на компоненты профиля поверхностной яркости линзовидной галактики NGC 80 (Сильченко и др. (2003), [13]): слева сверху — суммарный профиль, слева внизу — внутренний экспоненциальный диск после вычитания внешнего, справа внизу — внешний экспоненциальный диск после вычитания внутреннего, справа сверху — «остаток», то есть балдж. У NGC 80 ярко выраженный двухярусный экспоненциальный диск

лучается экспоненциальный профиль плотности. Характер вязкости при этом не оговаривается и не ограничивается, но из общих физических соображений, вероятно, речь идет о турбулентности, которая, согласно некоторым современным теориям, определяет локальный ход звездообразования. Небольшая работа Лина и Прингла [14] была чисто аналитической, но сейчас уже проведены и численные гидродинамические эксперименты [15], которые полностью подтвердили работоспособность идеи. Из первоначально плоского профиля для газа, с постоянной по радиусу поверхностной плотностью, в ходе звездообразования с временной шкалой, равной временной шкале вязкости, отбирающей момент у газа и порождающей уплотнение газового распределения ближе к центру, получается экспоненциальный звездный диск. Причем, что забавно, чисто эмпирически полу-

чается, что конечный экспоненциальный масштаб звездного диска жестко определяется начальными размерами диска газового и равен примерно его половине.

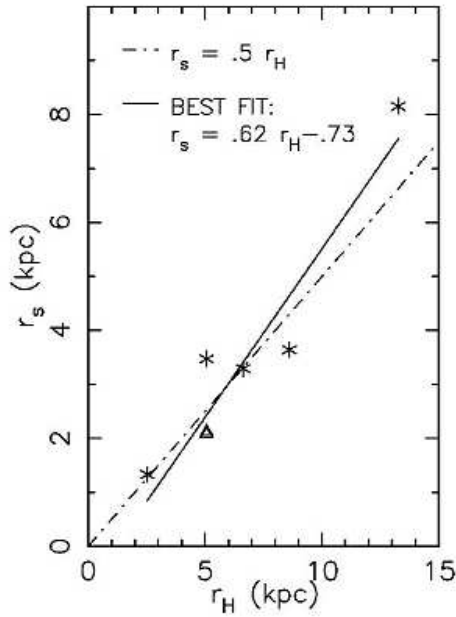


Рис. 4. Эмпирически полученная из численных моделей связь между экспоненциальным масштабом конечного звездного диска и размером начального газового диска в расчетах Slyz et al. (2002) [15]

С наблюдательной космологией связали эту идею молодой Бурно с соавторами [16]. Известно, что изображения дисковых галактик на больших красных смещениях, $z > 1$, выглядят очень клочковатыми. Размеры «комков» — порядка одного-полутора килопарсек. Бурно связал это наблюдательное явление с идеей своего соавтора Эльмегрини о том, что размеры областей (комплексов) звездообразования примерно равны размеру ячейки турбулентности (напомним, что турбулентность — это наиболее вероятный «родитель» вязкости в галактических дисках). Дальнейшее было уже дело техники: соавторы рассчитали модель эволюции галактического диска, в котором на раннем этапе газ неустойчив и фрагментирует на

комки с характерным масштабом 1 кпк. Включается звездообразование — на тех же характерных масштабах и на тех же характерных временах, что и фрагментация и турбулентность. И за времена 1.5–2 млрд лет формируется экспоненциальный, или кусочно-экспоненциальный, звездный диск и балдж («псевдобалдж»). Блестящей идеей был уход на красное смещение двойка: ранее основная критика идеи Лина и Прингла была как раз в том, что в ближней Вселенной, на $z = 0$, нигде не наблюдается такой могучей вязкости, которая нужна для построения экспоненциального диска. На $z = 2$, где вся Вселенная была существенно меньше, а все плотности существенно больше, и где реально наблюдаются увеличенные по сравнению с близкими к нам галактиками «ячейки звездообразования» (и турбулентности?), вязкости как раз хватает для кардинального перераспределения плотности газа вдоль радиуса галактики на относительно коротких временах, порядка 1–2 млрд лет.

Балджи и псевдобалджи

Если с построением экспоненциальных звездных дисков проблем сейчас нет, то с происхождением балджей в дисковых галактиках царит полная неясность. Поколебалось даже само представление о том, что же такое есть балдж в галактике и как его отличить от звездного ядра или от ядерного диска. Будем считать балджем относительно протяженную структуру (скажем, радиусом $\gg 10$ пк), толстую по z -координате. Теоретики сейчас строят балджи чаще всего двумя способами: большие балджи — «малым мержингом», маленькие балджи — «секулярной» эволюцией дисков галактик.

Большие балджи в спиральных галактиках ранних типов изначально считались близкими родственниками эллиптических галактик: тоже сфероиды, тоже однородные красные (т. е. старые), и профиль поверхностной яркости считался Вокулеровским — то есть таким же по форме, как и у эллиптических галактик. Однако уже ранние исследования Корменди [17, 18] намекали на то, что балджи в дисковых галактиках ранних типов похоже вращаются быстрее, чем эллиптические галактики той же светимости, то есть диск как бы «делится» моментом со своим балджем. Позднее появилась статистика фотометрических связей между дисками и балджами: и цвет у них похожий, и размеры коррелируют (например, [19, 20]). С повышением точности и пространственного разрешения фотометрических наблюдений куда-то ушли и Вокулеровские профили: теперь

профили балджей, даже больших, даже в галактиках ранних типов, все же ближе к экспоненте [21]. Тем не менее, для больших балджей продолжают предлагать происхождение слиянием мелких галактик ДО формирования окружающего диска. Однако в последнее время все-таки предпочтительнее выглядит сценарий множественных «малых мерджингов», то есть поглощений малых спутников, а не «большой мерджинг» (слияние галактик сравнимых масс), как для настоящих эллиптических галактик. Собственный сценарий для происхождения больших балджей — несмотря на то, что по глобальным свойствам большие балджи очень похожи на балджи маленькие и на «псевдобалджи» — вероятно приходится искать оттого, что радиальные потоки вещества к центру дисков, формирующиеся в процессе секулярной эволюции, все-таки недостаточно мощны, чтобы за 1—2 млрд лет набрать массу, соответствующую хорошему крупному балджу. Зато маленькие балджи, с массой порядка 10^9 масс Солнца, сейчас единогласно «образуют» секулярной эволюцией — постепенным формированием из вещества диска, стекающего к центру галактики.

Понятие секулярной эволюции и было введено Корменди в начале 80-х гг. как раз для объяснения происхождения «псевдобалджей» — когда он обратил внимание на то, что многие балджи с кинематической точки зрения скорее родственны толстым дискам, чем сфероидам типа эллиптической галактики: они вращаются быстрее, чем должны вращаться изотропные сфероиды такой степени сплюснутости, и динамически холоднее, т. е. демонстрируют небольшую дисперсию скоростей звезд, немногим выше, чем в дисках. Корменди назвал такие быстровращающиеся балджи «псевдобалджами»; с помощью молодых энтузиастов, сейчас термин распространился чуть ли ни на все типы ядерных структур недавнего происхождения (диски, кольца и ядерные бары). Динамики чуть позже, в 90-х, (см. выше обзор работ Фридли) представили модельные оценки того, как под действием бара за миллиард лет или чуть больше значительные массы газа из диска должны стечь к центру галактики и с большой вероятностью превратиться там в звезды псевдобалджа — толстой по z -координате подсистемы с моментом, происходящим из дисковой составляющей галактики. Сейчас секулярная эволюция — модный и широко обсуждаемый сценарий превращения спиральной галактики позднего типа в спиральную галактику раннего типа или даже в линзовидную галактику: считается, что небольшие балджи можно сильно нарастить в процессе секулярной эволюции [1].

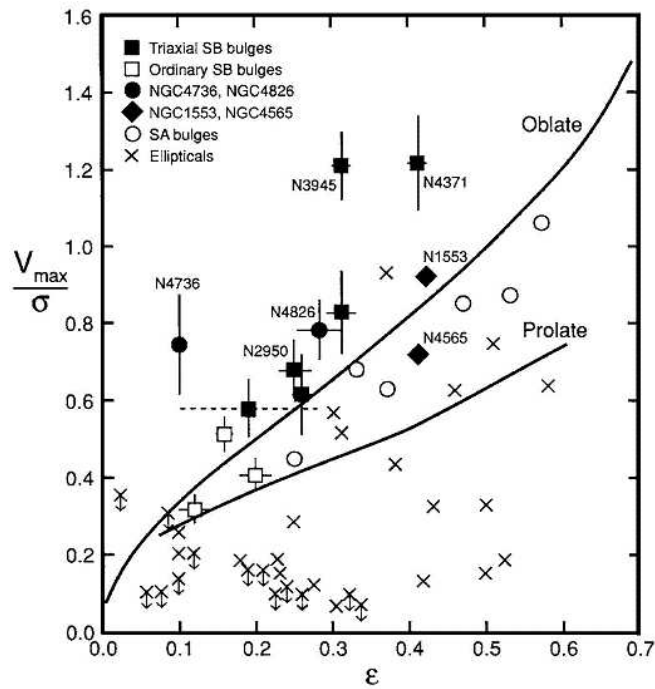


Рис. 5. Диаграмма из обзора Kormendy & Kennicutt (2004) [1], демонстрирующая кинематические свойства «псевдобалджей» (NGC 4736, NGC 3945, NGC 4371): они, при фиксированной сплюснутости изофот, вращаются быстрее не только эллиптических галактик, но и быстрее изотропных сфероидов, форма которых определяется центробежной силой

Относительно того, какой формы должен быть профиль поверхностной яркости в балдже, образованном секулярной эволюцией, обязательно ли он должен быть экспоненциальным, существуют пока разногласия. То, что нарисовано у Нормана и др. [5], больше напоминает Вокулеровский балдж с прилегающим к нему Фримановским диском II-го типа (Фримановский диск II-го типа — экспоненциальный с центральной дырой). Однако Стефан Курто, наблюдатель и большой энтузиаст экспоненциальных балджей, утверждает, ссылаясь отчасти на приватные сообщения Фридли, что в ходе секулярной эволюции формируются небольшие балджи с экспоненциальным профилем поверхностной плотности — совсем как те, что он в боль-

пом количестве обнаружил в своей выборке Sc-галактик. Возможно, тут многое зависит от начальных условий и особенно от начального количества газа в диске галактик: те же недавние модели Бурно с соавторами для эволюции «комковатых» дисков на $z = 2$ [22] показали, что если звездообразование в «комках» не слишком интенсивное и не разрушает «родительские комки», если большие «комки» целыми докатываются до центра галактики и там сливаются, образуя впоследствии балдж, то профиль яркости такого модельного балджа скорее Вокулеровский. Между тем, в природе Вокулеровские балджи встречаются все реже и реже...

Список литературы

1. *Kormendy J., Kennicutt J., R. C.* Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 42. — P. 603.
2. *Noguchi M.* Close encounter between galaxies. II - Tidal deformation of a disc galaxy stabilized by massive halo // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1987. — Vol. 228. — P. 635.
3. *Pfenniger D., Friedli D.* Structure and dynamics of 3D N-body barred galaxies // Astron. Astrophys. — 1991. — Vol. 252. — P. 75.
4. *Friedli D., Benz W.* Secular evolution of isolated barred galaxies. I — Gravitational coupling between stellar bars and interstellar medium // Astron. Astrophys. — 1993. — Vol. 268. — P. 65.
5. *Norman C. A., Sellwood J. A., Hasan H.* Bar Dissolution and Bulge Formation: an Example of Secular Dynamical Evolution in Galaxies // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 462. — P. 114.
6. *Bournaud F., Combes F., Semelin B.* The lifetime of galactic bars: central mass concentrations and gravity torques // MNRAS Letters. — 2005. — Vol. 364. — P. 18.
7. *Eskridge P. B., Frogel J. A., Pogge R. W. et al.* The Frequency of Barred Spiral Galaxies in the Near-Infrared // Astron. J. — 2000. — Vol. 119. — P. 536.
8. *Friedli D., Benz W.* Secular evolution of isolated barred galaxies. II. Coupling between stars and interstellar medium via star formation // Astron. Astrophys. — 1995. — Vol. 301. — P. 649.
9. *Freeman K.* On the Disks of Spiral and S0 Galaxies // Astrophys. J. — 1970. — Vol. 160. — P. 811.

10. *Erwin P., Beckman J. E., Pohlen M.* Antitruncation of Disks in Early-Type Barred Galaxies // *Astrophys. J., Lett.* — 2005. — Vol. 626. — P. 81.
11. *Pohlen M., Trujillo I.* The structure of galactic disks. Studying late-type spiral galaxies using SDSS // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 454. — P. 759.
12. *Bakos J., Trujillo I., Pohlen M.* Color Profiles of Spiral Galaxies: Clues on Outer-Disk Formation Scenarios // *Astrophys. J., Lett.* — 2008. — Vol. 683. — P. 103.
13. *Сильченко О., Копосов С., Власюк В., Спиридонова О.* Химически выделенное ядро и структура S0 галактики NGC 80 // *Астрон. журн.* — 2003. — Т. 80. — С. 107.
14. *Lin D. N. C., Pringle J. E.* The formation of the exponential disk in spiral galaxies // *Astrophys. J., Lett.* — 1987. — Vol. 320. — P. 87.
15. *Slyz A. D., Devriendt J. E. G., Silk J., Burkert A.* Forming stars on a viscous time-scale: the key to exponential stellar profiles in disc galaxies? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 333. — P. 894.
16. *Bournaud F., Elmegreen B. G., Elmegreen D. M.* Rapid Formation of Exponential Disks and Bulges at High Redshift from the Dynamical Evolution of Clump-Cluster and Chain Galaxies // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 670. — P. 237.
17. *Kormendy J., Illingworth G.* Rotation of the bulge components of disk galaxies // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 256. — P. 460.
18. *Kormendy J.* Rotation of the bulge components of barred galaxies // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 257. — P. 75.
19. *Aguerre J. A. L., Elias-Rosa N., Corsini E. M., Munoz-Tunon C.* Photometric properties and origin of bulges in SB0 galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 434. — P. 109.
20. *MacArthur L. A., Courteau S., Holtzman J. A.* Structure of Disk-dominated Galaxies. I. Bulge/Disk Parameters, Simulations, and Secular Evolution // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 582. — P. 689.
21. *Balcells M., Graham A. W., Dominguez-Palmero L., Peletier R. F.* Galactic Bulges from Hubble Space Telescope Near-Infrared Camera Multi-Object Spectrometer Observations: The Lack of $r^{1/4}$ Bulges // *Astrophys. J., Lett.* — 2003. — Vol. 582. — P. 79.
22. *Elmegreen B. G., Bournaud F., Elmegreen D. M.* Bulge Formation by the Coalescence of Giant Clumps in Primordial Disk Galaxies // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 67.

**МАГНИТОГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ КОНФИГУРАЦИИ
В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ:
СТРУКТУРА МАГНИТНОЙ ЗВЕЗДЫ,
ШАРОВАЯ МАГНИТНАЯ БОМБА И ДР.**

Магнитогидростатика представляет собою один из важных разделов магнитной гидродинамики, описывающей как лабораторную, так и космическую плазму, поскольку нам довольно часто приходится сталкиваться с такими магнитоплазменными образованиями, время жизни которых значительно превосходит характерное время релаксации системы к равновесию. Если течения плазмы в таких объектах не слишком резко выражены, то на первый план выходит проблема определения равновесного состояния системы. Более того, достаточно медленные эволюционные изменения объекта зачастую бывает возможно рассматривать как прохождение системой непрерывной последовательности равновесных состояний, т. е. как квазистатический процесс, обусловленный изменением некоторых «управляющих» параметров. Особенность магнитной гидростатики состоит в том, что система уравнений, определяющих магнитогидростатическое равновесие системы, обычно оказывается недоопределенной, в том смысле, что уравнение переноса энергии в условиях космической плазмы бывает очень трудно сформулировать с достаточной степенью определенности. Как правило, это уравнение и не выписывают в явном виде, заменяя его гипотезами вроде политропической связи между давлением газа и плотностью, или некоторой зависимостью между газовым давлением и магнитным потоком. Предполагается, что если найденное равновесное состояние будет в достаточной степени соответствовать требованиям наблюдательной астрофизики, то можно полагать, что и перенос энергии в системе в достаточной мере соответствует сделанным ранее предположениям общего характера. Понятно, что такой подход изначально предполагает возможность построения достаточно широкого спектра равновесий, чтобы можно было произвести подгонку рассчитанных модельных магнитогидростатических структур под наблюдательные данные. Но даже при

таком несколько упрощающем подходе исследование магнитогидростатических равновесий остается весьма сложной математической проблемой из-за нелинейного характера магнитной силы. Ситуация несколько облегчается в том случае, когда исследуемая система обладает определенным типом симметрии (трансляционной, аксиальной или винтовой). При построении равновесных магнитоплазменных конфигураций, обладающих симметрией того или иного типа, и при наличии силы тяжести, которая данной симметрии не нарушает, обычно решается прямая магнитогидростатическая задача: по заданной зависимости газового давления от магнитного потока $A(r, z)$ решается дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных (уравнение типа Грэда—Шафранова) при определенных граничных условиях и находится A как функция координат, т. е. таким образом определяется магнитная структура системы. Не меньший интерес, однако, представляет постановка обратной задачи, когда, считая магнитную структуру системы известной, мы рассчитываем соответствующие ей равновесные распределения давления, плотности и температуры. Обоснованием подобного подхода служит то, что обычно, приступая к моделированию активных солнечных образований, глобального поля Солнца или поля магнитных звезд, мы заранее представляем, какого типа магнитные конфигурации нам могут встретиться, т. е. заранее знаем примерный вид функции потока $A(r, z)$, но, как правило, совершенно не представляем, каким пространственным распределениям давления, плотности и температуры эти, интересующие нас, магнитные конфигурации соответствуют и к каким наблюдательным следствиям могут приводить. Именно на эти важнейшие для наблюдательной астрофизики вопросы и дает ответ обратная задача магнитной гидростатики. Важно подчеркнуть, что для систем, обладающих трансляционной и осевой симметрией, эта обратная задача допускает общее решение для давления, плотности и температуры в виде интегралов от комбинаций производных от функции потока по координатам. Это позволяет уйти от необходимости решать дифференциальное уравнение второго порядка и находить решение практически для любой заданной наперед функции $A(r, z)$. В данной лекции приводится ряд новых частных решений как прямой, так и обратной магнитогидростатической задачи, представляющих значительный интерес как для физики Солнца, так и для астрофизики в целом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ОРБИТ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Определение орбит внесолнечных планет становится важной частью астрономии. Здесь мы кратко описываем методологию определения орбит экзопланет по кривой лучевой скорости материнской звезды; приводим основные соотношения метода и опирающийся на них эффективный алгоритм определения орбит, как близких к круговым, так и умеренно и сильно эксцентрических.

Determination of the orbits of extrasolar planets has become an important part of astronomy. Here we briefly describe the methodology for determining exoplanetary orbits using the radial velocity curve of a parent star. We derive basic relations and, based on them, an efficient algorithm for determining orbits that are nearly circular and those with moderate or large eccentricities.

Введение

Исследование внесолнечных планет представляется одной из самых интересных тем современной астрономии. Определение их орбит становится важной частью небесной механики. По аналогии с вновь открываемыми астероидами в Солнечной системе можно говорить об определении первоначальных орбит, или об улучшении орбит по мере накопления наблюдательных данных.

Чуть подробнее о терминологии. Мы не отказываемся от традиционных словосочетаний: улучшение орбит означает на самом деле улучшение наших знаний о них. Сами орбиты не меняются от наших наблюдений и их последующей математической обработки. Если же мы реально изменяем пути небесных тел (пока — космических аппаратов, в недалеком будущем — опасных астероидов и комет, в более отдаленном будущем — орбиту Фобоса, предотвращая его падение на густо заселенный Марс), то говорим о коррекции орбиты. Обратимся к *внесолнечным планетам*. Разве существуют *внутрисолнечные*

планеты? Каждый термин может быть удачным или нет. Но он не бывает корректным во всех случаях. Например, знаменитый *канторов дисконтинуум* плотен в себе и одновременно нигде не плотен. А *сверхновые звезды?* Новые родились вчера, а сверхновые — мину-ту назад? Теперь принято планеты, обращающиеся вокруг звезд (не нашего Солнца) называть *внесолнечными планетами*, или *экзопла-нетами*. Другие термины заняты. Например, внешние планеты — это Юпитер, Сатурн, ...

Здесь мы остановимся на задаче определения орбиты внесолнеч-ной планеты по кривой лучевой скорости. Обзор более широкой про-блематики см. в трудах наших конференций [1–3] и в статьях [4–6]. Обратим внимание, что весьма близкая задача определения орбит и масс в спектрально-двойных звездах хорошо исследована [7], но считать ее до конца решенной нельзя. В планетных исследованиях мы требуем большей точности по сравнению с обычной для астро-физических исследований спектрально-двойных звезд.

Основные соотношения метода лучевых скоростей

Исследуя систему спутников Юпитера, О. Рёмер открыл фун-даментальную закономерность: продолжительность периодического процесса зависит от системы отсчета. Рассмотрим некоторый ста-бильный периодический процесс в точке O , информация о котором распространяется со скоростью c и принимается в точке O_1 . Обозна-чим через v лучевую скорость, т. е. скорость изменения расстояния между O и O_1 . Регистрируемый в точке O_1 период отличается от исходного P в точке O на величину

$$\Delta P = \frac{v}{c} P. \quad (1)$$

Образно говоря, стрелки часов для бегущего к ним наблюдателя кру-тятся с бешеной скоростью, и практически стоят, когда наблюдатель убегает от них. Правда, и скорость бега должна быть бешеной — ну хотя бы процентов 99 от скорости света.

Именно по эффекту Рёмера в 1991 г. была открыта первая экзо-планетная система около пульсара PSR B1257+12. Причина наблю-даемых колебаний периода вращения пульсара — движение звезды вокруг центра масс звезда—планета.

Специфическим случаем эффекта Рёмера выступает эффект До-плера, когда периодический процесс совмещен с идущим к наблюда-

телю лучом. Надо только период заменить на частоту или длину волны

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}. \quad (2)$$

Часы сами бегут к наблюдателю, отсчитывая колебания электромагнитного поля. И это не метафора. Секунда *определяется* теперь через частоту монохроматического излучения, получаемого некоторым стандартным путем.

Из 422 открытых на 7 января 2010 г. экзопланет 392 были обнаружены по доплеровскому смещению линий в спектре материнской звезды. Будем считать известной кривую лучевой скорости звезды относительно барицентра O_1 Солнечной системы в функции времени. Опишем, как по этим данным можно определить орбиту планеты. Пусть вокруг звезды массы m_* движется единственная планета массы m (в случае двух и более планет надо выделять гармоники разных периодов и амплитуд). Введем систему отсчета с началом в барицентре O системы звезда–планета и осью z в направлении O_1O . Положение осей x, y в ориентированной картинной плоскости безразлично. Обозначим через $a, e, i, \Omega, g, u, M, E, \theta$ элементы орбиты планеты относительно звезды: большую полуось, эксцентриситет, наклон к картинной плоскости, долготу восходящего узла, аргумент перицентра, аргумент широты, среднюю, эксцентрическую и истинную аномалии. Те же величины для орбиты звезды относительно барицентра O снабдим звездочкой в качестве нижнего индекса. Они связаны между собой очевидными соотношениями

$$a_* = \frac{m}{m_* + m}a, \quad e_* = e, \quad i_* = i, \quad \Omega_* = \Omega,$$

$$g_* = g + \pi, \quad u_* = u + \pi, \quad M_* = M, \quad E_* = E, \quad \theta_* = \theta. \quad (3)$$

Как показано в [3, 6], при современной точности наблюдений введенную систему отсчета можно считать инерциальной. В таком случае z -компоненту скорости звезды можно найти, используя элементарные формулы задачи двух тел [8, 9]. Добавляя лучевую скорость движения O , найдем наблюдаемую лучевую скорость

$$v = v_0 + v_1 + K \cos u_*,$$

где v_0 — скорость барицентра системы звезда–планета, $v_1 = Ke_* \cos g_*$. Величины v_0, v_1 постоянны и не играют существенной

роли. Амплитуда колебаний равна

$$K = \frac{m \sin i_*}{m_* + m} \sqrt{\frac{Gm}{a_*(1 - e_*^2)}},$$

где G — постоянная тяготения. Переходя к элементам планеты относительно звезды согласно (3), получим

$$v = v_0 + v_1 - K \cos u, \quad (4)$$

$$v_1 = -Ke \cos g, \quad K = \frac{m \sin i}{\sqrt{m_* + m}} \sqrt{\frac{G}{a(1 - e^2)}}. \quad (5)$$

Периоды обращения звезды вокруг центра масс и планеты вокруг звезды совпадают, и мы можем записать

$$P = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{G(m_* + m)}}. \quad (6)$$

Мы считаем кривую лучевой скорости известной и безошибочной (рис. 1). Учет погрешностей происходит уже на стадии улучшения орбит. Кривая дает нам непосредственно наименьшее v_{min} и наибольшее v_{max} значения лучевой скорости. Отсюда

$$v_0 + v_1 = \frac{1}{2}(v_{max} + v_{min}), \quad K = \frac{1}{2}(v_{max} - v_{min}).$$

Ниже понадобятся три точки на кривой (рис. 1), отвечающие последовательным значениям времени t_1, t_2, t_3 , при которых скорости равны наименьшему v_{min} , среднему $(v_{max} + v_{min})/2$ и наибольшему v_{max} значению. Им соответствуют значения аргумента широты $u_1 = 0, u_2 = \pi/2, u_3 = \pi$.

Имеющейся информации достаточно, чтобы полагать амплитуду K , период P и, следовательно, среднее движение $n = P/(2\pi)$ известными из наблюдений (разумеется, не прямых наблюдений). Произведение постоянной тяготения на массу Солнца можно считать известным точно. Масса m_* в массах Солнца известна по ее спектру с точностью в несколько процентов. С такой точностью мы можем заменить в (6) $m_* + m$ на m_* . Во втором приближении можно подставить сюда оценку m первого приближения. По третьему закону Кеплера находим большую полуось

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 G(m_* + m)}{4\pi^2}}. \quad (7)$$

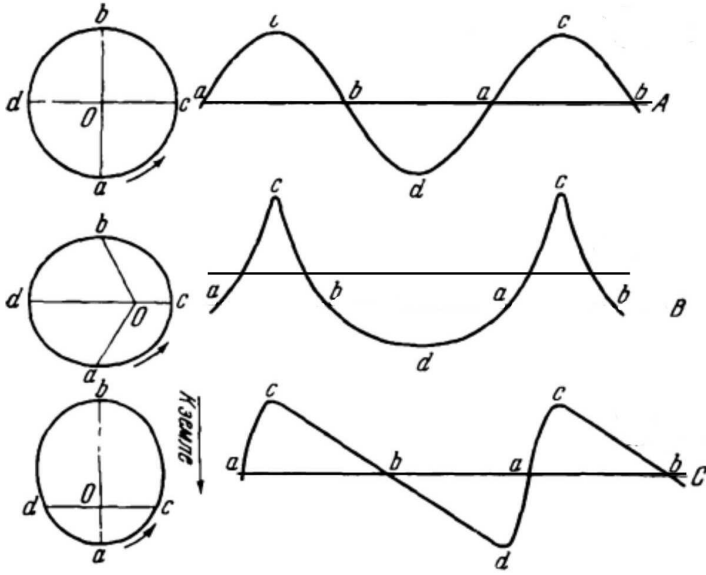


Рис. 1. Кривые лучевых скоростей (адаптировано из [10]): круговая орбита (A), $e = 0.5, g = 0$ (B), $e = 0.5, g = 3\pi/2$ (C)

Из (5, 7) можно вывести соотношение, связывающее массу планеты, наклон и эксцентриситет

$$m \sin i = K \sqrt{1 - e^2} \sqrt[3]{\frac{(m_* + m)^2 P}{2\pi G}}. \quad (8)$$

Из геометрических соображений очевидно, что положение линии узлов остается неопределенным. Что касается наклона, мы не можем различить прямого и обратного движения. Иными словами, мы не знаем знака $\cos i$. Обычно принимают $0 < i \leq 90^\circ$. Возможность $i = 0$ исключена, т. к. в этом случае $K = 0$, и метод не работает. Итак, a известно, Ω выпадает из рассмотрения. Нахождение оставшихся четырех кеплеровских элементов и массы m — более трудная задача. Рассмотрим три случая, начиная с простейшего.

Определение круговой орбиты

Согласно (4) v представляется синусоидой в функции от аргумента широты. В функции времени в общем случае мы имеем более сложную кривую (рис. 1).

Пусть кривая лучевой скорости — синусоида (с точностью до погрешностей измерения). Выше найдены 2 из 3 независимых элементов круговой орбиты (Ω опускается): большая полуось a и эпоха прохождения восходящего узла t_2 . Обратим внимание, что мы не знаем положения линии узлов, но различаем восходящий и нисходящий узлы. Подставляя в (8) $e = 0$, находим произведение массы планеты на синус наклона к картинной плоскости

$$m \sin i = K \sqrt[3]{\frac{(m_* + m)^2 P}{2\pi G}}. \quad (9)$$

Как уже говорилось, в первом приближении можно в правых частях (7), (9) положить $m = 0$.

Мы определили все, что возможно. Без дополнительной информации нельзя найти m и $\sin i$ отдельно. Остается довольствоваться статистикой, по которой среднее значение $\sin i$ при равновероятных ориентациях вектора площадей равно $\pi/4$.

Во втором приближении в правые части (7 – 9) можно вместо m подставить его минимальное $m' = m \sin i$ или среднее $\bar{m} = (4/\pi)m \sin i$ значение из предыдущего приближения.

Определение орбиты с умеренным эксцентриситетом

Если анализ кривой лучевой скорости показывает, кроме основного тона периода P , наличие обертонов, то орбита эксцентрична. Пусть эксцентриситет орбиты мал, $e < 0.1$. Можно воспользоваться рядом Фурье, выражающим среднюю аномалию через истинную [8, 9]. С точностью до третьей степени эксцентриситета

$$M = \theta - 4\beta(1 - \beta^2) \sin \theta + 3\beta^2 \sin 2\theta - \frac{8}{3}\beta^3 \sin 3\theta, \quad (10)$$

где

$$\beta = \frac{e}{1 + \sqrt{1 - e^2}}, \quad e = \frac{2\beta}{1 + \beta^2}. \quad (11)$$

Трем моментам времени t_k соответствуют аргументы широты u_k и истинные аномалии θ_k :

$$u_1 = 0, \quad u_2 = \frac{\pi}{2}, \quad u_3 = \pi; \quad \theta_1 = -g, \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} - g, \quad \theta_3 = \pi - g.$$

Разложение (10) дает средние аномалии

$$\begin{aligned} M_1 &= -g + 4\beta(1 - \beta^2) \sin g - 3\beta^2 \sin 2g + \frac{8}{3}\beta^3 \sin 3g, \\ M_2 &= \frac{\pi}{2} - g - 4\beta(1 - \beta^2) \cos g + 3\beta^2 \sin 2g + \frac{8}{3}\beta^3 \cos 3g, \\ M_3 &= \pi - g - 4\beta(1 - \beta^2) \sin g - 3\beta^2 \sin 2g - \frac{8}{3}\beta^3 \sin 3g. \end{aligned} \quad (12)$$

Образует взвешенные разности

$$\begin{aligned} \frac{M_1 - 2M_2 + M_3}{8} &= \beta(1 - \beta^2) \cos g - \frac{3}{2}\beta^2 \sin 2g - \frac{2}{3}\beta^3 \cos 3g, \\ \frac{\pi + M_1 - M_3}{8} &= \beta(1 - \beta^2) \sin g + \frac{2}{3}\beta^3 \sin 3g. \end{aligned} \quad (13)$$

Левые части (13) известны, поскольку известно среднее движение. Вводя переменные Лапласа

$$x = \beta \cos g, \quad y = \beta \sin g,$$

представим уравнения (13) в виде

$$f_1(x, y) = c_1, \quad f_2(x, y) = c_2. \quad (14)$$

Здесь

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\pi}{4P}(t_1 - 2t_2 + t_3), \quad c_2 = \frac{\pi}{8P}(P + 2t_1 - 2t_3), \\ f_1 &= x - 3xy - \frac{5}{3}x^3 + xy^2, \quad f_2 = y + x^2y - \frac{5}{3}y^3, \end{aligned} \quad (15)$$

Решая систему (14) последовательными приближениями и сохраняя члены третьего порядка, получим

$$x = c_1 + 3c_1c_2 + \frac{5}{3}c_1^3 + 8c_1c_2^2, \quad y = c_2 - c_1^2c_2 + \frac{5}{3}c_2^3. \quad (16)$$

Можно вернуться к β, g :

$$\beta = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \cos g = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \sin g = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (17)$$

после чего эксцентриситет вычисляется по второй из формул (11), а произведение $m \sin i$ — по формуле (8).

Определение эллиптической орбиты

Для больших эксцентриситетов разложение (10) сходится медленно и лучше перейти к точным формулам. Воспользуемся известными представлениями средней аномалии через эксцентрическую и эксцентриской через истинную

$$\begin{aligned} M &= E - e \sin E, & \sin E &= \sqrt{1 - e^2} \frac{\sin \theta}{1 + e \cos \theta}, \\ E &= \theta - 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin \theta}{1 + \beta \cos \theta}. \end{aligned} \quad (18)$$

Первые две из формул (18) приводятся в любом учебнике по небесной механике. Третья же встречается редко [8, 9, 11], хотя обладает несомненными преимуществами перед сингулярной стандартной, связывающей тангенсы половин аномалий. Заметим, что арктангенс в (18) однозначен, меняется от $-\pi/2$ до $\pi/2$.

Комбинируя три формулы (18) с учетом (11), получим

$$M = \theta - 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin \theta}{1 + \beta \cos \theta} - \frac{2\beta(1 - \beta^2) \sin \theta}{(1 + \beta^2)(1 + 2\beta \cos \theta + \beta^2)}. \quad (19)$$

Разложения (12, 13) для средних аномалий заменяются точными формулами

$$\begin{aligned} M_1 &= -g + 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 + \beta \cos g} + \frac{2\beta(1 - \beta^2) \sin g}{(1 + \beta^2)(1 + 2\beta \cos g + \beta^2)}, \\ M_2 &= \frac{\pi}{2} - g - 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \cos g}{1 + \beta \sin g} - \frac{2\beta(1 - \beta^2) \cos g}{(1 + \beta^2)(1 + 2\beta \sin g + \beta^2)}, \\ M_3 &= \pi - g - 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 - \beta \cos g} - \frac{2\beta(1 - \beta^2) \sin g}{(1 + \beta^2)(1 - 2\beta \cos g + \beta^2)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Мы приходим к тем же уравнениям (14) при тех же значениях c_k и

$$\begin{aligned} 4f_1 &= 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \cos g}{1 + \beta \sin g} + \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 + \beta \cos g} - \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 - \beta \cos g} + \\ &+ \frac{2\beta(1 - \beta^2) \cos g}{(1 + \beta^2)(1 + 2\beta \sin g + \beta^2)} - \frac{2\beta^2(1 - \beta^2) \sin 2g}{(1 + \beta^2)(1 - 2\beta^2 \cos 2g + \beta^4)}, \\ 4f_2 &= \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 + \beta \cos g} + \operatorname{arctg} \frac{\beta \sin g}{1 - \beta \cos g} + \frac{2\beta(1 - \beta^2) \sin g}{1 - 2\beta^2 \cos 2g + \beta^4}, \end{aligned}$$

что можно упростить, пользуясь формулами для суммы и разности арктангенсов

$$\begin{aligned}
4f_1 &= 2 \operatorname{arctg} \frac{\beta \cos g}{1 + \beta \sin g} - \operatorname{arctg} \frac{\beta^2 \sin 2g}{1 - \beta^2 \cos 2g} + \\
&+ \frac{2\beta(1 - \beta^2) \cos g}{(1 + \beta^2)(1 + 2\beta \sin g + \beta^2)} - \frac{2\beta^2(1 - \beta^2) \sin 2g}{(1 + \beta^2)(1 - 2\beta^2 \cos 2g + \beta^4)}, \\
4f_2 &= \operatorname{arctg} \frac{2\beta \sin g}{1 - \beta^2} + \frac{2\beta(1 - \beta^2) \sin g}{1 - 2\beta^2 \cos 2g + \beta^4}.
\end{aligned} \tag{21}$$

Можно перейти к координатам x, y :

$$\begin{aligned}
4f_1 &= 2 \operatorname{arctg} \frac{x}{1 + y} - \operatorname{arctg} \frac{2xy}{1 - x^2 + y^2} + \frac{2x(1 - x^2 - y^2)}{(1 + x^2 + y^2)(1 + 2y + x^2 + y^2)} - \\
&- \frac{4xy(1 - x^2 - y^2)}{(1 + x^2 + y^2)(1 - 2x^2 + 2y^2 + (x^2 + y^2)^2)}, \\
4f_2 &= \operatorname{arctg} \frac{2y}{1 - x^2 - y^2} + \frac{2y(1 - x^2 - y^2)}{1 - 2x^2 + 2y^2 + (x^2 + y^2)^2}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Система двух уравнений (14) относительно двух неизвестных β, g или x, y не кажется слишком сложной, тем более, что мы знаем границы

$$0 < \beta < 1, \quad 0 \leq g < 2\pi, \quad x^2 + y^2 < 1$$

и начальное приближение (16), полученное с точностью до третьей степени эксцентриситета.

Исследование уравнений

Пока мы обращались с уравнениями и рядами формально. Пора исследовать законность операций.

Прежде всего установим независимость функций f_1, f_2 , для чего достаточно вычислить якобиан J . Дифференцируя (22) убедимся, что J представляет собой дробно-рациональную функцию от x, y . Однако она слишком сложна для исследования. Обратимся к рядам. Разложение (10) сходится при $|\beta| < 1$. Следовательно, ряды (15) сходятся при $x^2 + y^2 < 1$. Поэтому представление якобиана рядом

$$\begin{aligned}
J &= \det \frac{\partial(f_1, f_2)}{\partial(x, y)} = \begin{vmatrix} 1 - 3y - 5x^2 + y^2 & -3x + 2xy \\ 2xy & 1 + x^2 - 5y^2 \end{vmatrix} = \\
&= 1 - 3y - 4x^2 - 4y^2
\end{aligned} \tag{23}$$

справедливо при всех (а не только малых) значениях эксцентриситета эллиптической орбиты.

Замечание. Обратим внимание, что вычисленные нами выражения для f_k точны до β^3 , следовательно, J точен до β^2 , и только члены не выше второго порядка мы и сохранили.

Итак, J не равен тождественному нулю и функции f_1, f_2 независимы. Из (23) вытекает, что с указанной точностью J обращается в нуль на окружности

$$x^2 + \left(y + \frac{3}{8}\right)^2 = \left(\frac{5}{8}\right)^2. \quad (24)$$

В самом благоприятном случае $g = -\pi/2$ разрешимость гарантирована при $\beta < 1$, что всегда выполнено. В самом неблагоприятном случае $g = \pi/2$ особенность наступает при

$$x = 0, \quad y = \frac{1}{4}, \quad \beta = \frac{1}{4}, \quad e = \frac{8}{17}. \quad (25)$$

Приятно, что множество точек обращения якобиана в нуль одномерно и встречается лишь при больших эксцентриситетах. Более того, если мы перейдем от точек $v_{min}, (v_{max} + v_{min})/2$ и v_{max} к последовательным точкам $v_{max}, (v_{max} + v_{min})/2$ и v_{min} , то якобиан обратится в нуль на другой окружности, и лишь две общие для двух окружностей точки окажутся особыми.

Все же остановимся подробнее на вопросе об особых случаях определения орбиты, связанных с обращением якобиана в нуль.

1. Ограничимся первой степенью эксцентриситета в выражениях (15) для f_k . В этом приближении якобиан равен единице, особенностей нет. Решение тривиально: $x = c_1, y = c_2$.

2. Ограничимся второй степенью эксцентриситета. Система (14) равносильна системе

$$x - 3c_2x = c_1, \quad y = c_2.$$

Ее общее решение находится легко

$$x = \frac{c_1}{1 - 3c_2}, \quad y = c_2,$$

если $c_2 \neq 1/3$ или, что то же, $y \neq 1/3$. В данном приближении равенство $y = 1/3$ равносильно $J = 0$.

Осталось определить область сходимости рядов (16). Она определяется особыми точками двух типов: трансцендентными и алгебраическими.

1. Трансцендентные особенности. Они возникают, когда при стремлении x или y к бесконечности функции f_1, f_2 принимают конечные значения. Второе из соотношений (22) показывает, что в этом случае $c_2 = 0$. Следовательно, $y = 0, x \rightarrow \infty$, и первое из соотношений (22) дает $c_1 = \pm\pi/4$.

2. Алгебраические особенности. Это — корни якобиана *при комплексных значениях аргументов*. Найти их аналитически не представляется возможным. Но если ограничиться в якобиане (23) вторыми степенями величин x, y , то уравнение для них сведется к квадратному. Переходя от x, y к β, g , получим

$$4\beta^2 = 1 - 3\beta \sin g. \quad (26)$$

Фактически мы пользуемся разложениями по степеням β , так что g можно считать вещественным. В таком случае наименее благоприятное значение g равно $\pi/2$, и тогда из (26) следует $\beta = 1/4$.

Итак, область сходимости рядов (16) определяется алгебраическими вещественными точками:

$$\beta < \frac{1}{4}, \quad e < \frac{8}{17}. \quad (27)$$

Замечание. Если период обращения планеты велик, то сначала мы имеем лишь часть кривой лучевой скорости. Сколько-нибудь точную орбиту можно получить, только зная амплитуду K , так что на кривой должны лежать точки v_{min} и v_{max} . Если их только две, и первой встречается v_{max} , то алгоритм легко модифицировать под последовательность $v_{max}, (v_{max} + v_{min})/2$ и v_{min} .

О точности редуций

Первые внесолнечные планеты были открыты, когда точность измерений лучевых скоростей достигла 10 м/с. Теперь используются спектрометры на порядок более точные, с погрешностью около 1 м/с. Это близко к теоретическому пределу, обусловленному нестабильностью звездных атмосфер с движущимися вверх и вниз массами газа.

Теория должна быть по крайней мере столь же точной, как и наблюдения, а лучше на порядок точнее. Следовательно, мы должны

обеспечить теорию движения наблюдателя в инерциальной системе с началом в барицентре Солнечной системы с погрешностью не более 1 м/с, а лучше 10 см/с. Поэтому мы должны сделать все необходимые редукции для отнесения наблюдателя к барицентру Солнечной системы. В качестве примера упомянем, что скорость Земли относительно барицентра системы Земля—Луна и скорость Солнца относительно барицентра системы Солнце—Юпитер равна 13 м/с. Что касается вращения Земли, достаточно считать его равномерным и не учитывать прецессию, нутацию и движение полюса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-3290.2010.2), а также Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)» Федерального агентства по образованию Минобрнауки РФ (грант 2.1.1/504).

Список литературы

1. *Соколов, Л. Л.* О динамике внесолнечных планетных систем // Физика Космоса: Тр. 31-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2002 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та.
2. *Холшевников, К. В., Кузнецов, Э. Д.* О распределении больших полюсей орбит внесолнечных планет // Физика Космоса: Тр. 31-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2002 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та.
3. *Холшевников, К. В.* Внесолнечные планеты // Физика Космоса: Тр. 32-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3—7 февр. 2003 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та.
4. *Brown R. A.* Photometric Orbits of Extrasolar Planets // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 702. — P. 1237.
5. *Nesvorný D., Morbidelli A.* Mass and Orbit Determination from Transit Timing Variations of Exoplanets // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 636.
6. *Холшевников, К. В.* Методы обнаружения и статистика внесолнечных планет // *Астрономия: традиции, настоящее, будущее: Сб. обзорных докладов на конференции, приуроченной к 125-летию АИ СПбГУ, СПб, 26—30 июня 2006.*
7. *Мартынов Д. Я.* Курс общей астрофизики. — М.: Наука, 1988.

8. *Battin R. H.* An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics. — Reston, Virginia, USA: AIAA educ. ser., 1987.
9. *Холшевников К. В., Титов В. Б.* Задача двух тел. — СПб: СПбГУ, 2007.
10. *Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И.* Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1977.
11. *Уинтнер А.* Аналитические основы небесной механики. — М.: Наука, 1967.

**НОВОЕ О ПРИРОДЕ КОМЕТ
ПОСЛЕ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ
АЙС, ВЕГА, ДЖОТТО, ДИП СПЕЙС,
СТАРДАСТ, ДИП ИМПЕКТ
И ПЕРЕД МИССИЕЙ РОЗЕТТА**

Введение

Почему астрономов интересуют кометы? Человечество интересуется кометами с очень давних пор. Правда, в далекие времена кометы представлялись людям как знамения, как небесные предвестники трагических событий на Земле — будь то смерть вождя племени, короля какой-либо страны, страшная эпидемия чумы или холеры, разрушительная война, неурожай, голод и т. д. и т. п. Яркую комету, появившуюся в мае—июне 44 г. до н. э. во время игр, организованных Октавианом в память погибшего перед этим в Сенате от рук заговорщиков Юлия Цезаря, сочли небесным знамением, появлением во время игр души скончавшегося римского понтифика. Киевский князь Вещий Олег за год до своей смерти, в 911 г., увидел яркую комету в созвездии Геркулеса и воспринял это как недобрый знак, так как волхвы предсказали ему смерть в год появления кометы на небе. В следующем, 912 г., снова появилась яркая комета, на этот раз в созвездии Льва (это была комета Галлея). И когда она засияла сперва в разрывах облаков, а затем полностью на чистом небе, Олег, справлявший тризну по погибшим своим дружинникам на самой высокой горе под Киевом (сейчас это центр Киева) почувствовал боль в сердце от «укуса небесного змия», вспомнив предсказание волхвов. Это был инфаркт, от которого Вещий Олег скончался. Конечно, все эти весьма странные, но все же случайные совпадения, никакого отношения к науке не имеющие, так как кометы даже ничтожного физически ощутимого влияния на земные события и на судьбы людей не оказывают, а оказывают только психологическое воздействие, да и то на людей со слабой психикой и легко поддающихся гипнозу или внушению.

Древние хроники человеческой цивилизации сохранили многочисленные свидетельства за много веков до н. э. о появлении необыкновенно ярких комет с огромными хвостами, протянувшимися через весь небосвод. Однако, несмотря на богатый наблюдательный опыт за яркими кометами, древние философы долго полагали, что кометы являются земными испарениями, атмосферными явлениями, пока Тихо Браге в 1577 г. точными параллактическими наблюдениями ярчайшей кометы Средневековья не показал огромную удаленность этой кометы от Земли по сравнению с Луной, доказав тем самым, что кометы являются самостоятельными небесными телами. Теория орбитального движения комет была разработана И. Ньютоном и Э. Галлеем, еще в XVII в. сделавшими верное предположение о том, что кометы обладают твердым ядром, которое для простоты можно считать материальной точкой, движущейся по закону всемирного тяготения вокруг Солнца. Газовую природу кометных хвостов Ньютон предполагал еще в 1687 г., говоря, что «хвост кометы есть не что иное, как тончайший пар, испускаемый головой или ядром кометы вследствие его нагревания». Большую роль для понимания физической природы и особенностей динамической эволюции комет сыграла знаменитая комета Галлея, которая регулярно наблюдалась человечеством через интервалы в 70–80 лет, начиная с XI в. до н. э.

Кометы относятся к группе малых тел Солнечной системы, к которой также принадлежат малые планеты и огромное количество метеорных тел, заполняющих межпланетное пространство. Но в отличие от других малых тел кометы обладают уникальной способностью при приближении к Солнцу развивать из сравнительно небольших по размерам ядер (1–20 км) громадные газово-пылевые оболочки (атмосферы), превосходящие по своей протяженности все известные объекты Солнечной системы — астероиды, планеты и Солнце. Главная особенность кометного ядра — непрерывная способность возобновлять и поддерживать в огромном объеме газово-пылевую атмосферу, состоящую из различных атомов, молекул, ионов, молекулярных комплексов и пылинок разных размеров. Такой процесс возможен вследствие того, что кометные ядра состоят в основном из водного льда, и других замороженных газов, включая органику, а также из тугоплавкого метеоритного вещества в виде пыли и более крупных фрагментов. Вследствие исходной ледяной природы кометные ядра отличаются крайней нестационарностью происходящих в них физических процессов в результате воздействия на кометное ядро солнечной корпускулярной и фотонной радиации.

Кометы, по современным представлениям, состоят из реликтового вещества, входившего в состав протопланетного облака и из которого в результате аккреции образовались тела Солнечной системы. Следовательно, кометные ядра содержат в себе ценную информацию о начальных физико-химических условиях в протопланетном облаке, поэтому использование достоверных данных о ядрах комет может дать возможность существенно улучшить космогоническую модель Солнечной системы, особенно на ее ранних стадиях развития. Кометы также являются своеобразными индикаторами физических условий в межпланетном космическом пространстве. Они активно взаимодействуют с солнечным фотонным и корпускулярным излучением, а также с межпланетной материей, и поэтому характер эволюционных и нестационарных физических процессов, протекающих в их ядрах, головах и хвостах, порой существенно зависит как от уровня солнечной активности, так и от быстро меняющихся физических условий в межпланетном пространстве. Это позволяет рассматривать кометы как своеобразные зонды для диагностики межпланетной материи и солнечной плазмы, истекающей из солнечной короны в виде солнечного ветра. Сведения, получаемые о межпланетном пространстве при запуске дорогостоящих космических аппаратов, не всегда дают полную информацию о нем, особенно на значительных гелиоцентрических расстояниях и больших удалениях от плоскости эклиптики. Здесь кометы пока остаются практически единственным источником информации о солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. В последнее время кометы стали рассматриваться в качестве источника органического вещества, занесенного на планеты Солнечной системы и ставшего возможным источником зарождения жизни на планете Земля.

На больших гелиоцентрических расстояниях комета чаще всего выглядит как звездообразный точечный объект. При приближении к Солнцу она превращается в туманный объект, в котором начинают различаться диффузная оболочка — кома и центральная конденсация, включающая в себя ледяное ядро кометы. В дальнейшем у кометы образуется один или несколько хвостов.

Ученых кометы интересуют, во-первых, потому, что кометные ядра являются реликтовыми «кирпичиками», из которых образовалась Солнечная система. Кометы сохраняют первичное вещество — свидетельство ранней стадии зарождения Солнца и планет 4.6 млрд лет тому назад. Во-вторых, кометы — это своеобразные индикаторы физических условий в межпланетной среде и средство диагностики

межпланетной плазмы, солнечного ветра и вспышек солнечных космических лучей, причем как на малых, так и на больших гелиоцентрических расстояниях и гелиографических широтах. В-третьих, кометы — естественные космические лаборатории, в которых происходят уникальные физические явления, невозможные для воспроизведения в земных лабораториях. В-четвертых, существует вероятность столкновения ядра кометы с Землей, следствием которого может быть глобальная катастрофа. Примерами таких столкновений являются Тунгусский «метеорит» в 1908 г. и комета динозавров 65 млн лет тому назад.

Помимо всего прочего, кометы сыграли большую роль в развитии науки, особенно физики, математики и космонавтики. Так, на комете Галлея был проверен и триумфально подтвержден закон всемирного тяготения. Когда она вернулась в 1759 г., как и предсказала ей зарождающаяся тогда наука — небесная механика (Э. Галлей, 1709) закон всемирного тяготения был безоговорочно воспринят всеми учеными как один из фундаментальных законов природы. Первый молекулярный спектр был получен в 1864 г. Донати для кометы 1864 II, который позже был правильно истолкован Хаггинсом как спектр молекулы углерода (полосы Свана), что послужило толчком для первых шагов молекулярной спектроскопии. Кометные хвосты демонстрировали реальность давления света на твердые тела и газы, что было доказано теоретически и экспериментально (Фридрих Бессель, Максвелл, Федор Бредихин, Петр Лебедев) в XIX—XX вв. Для решения уравнений движения комет были развиты новые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений (Адамс, Коуэлл и др.). Исследование динамической эволюции комет выявило разительные изменения их орбит в поле тяготения планет, что было использовано в космонавтике для пертурбационных маневров космических аппаратов в поле тяготения планет Солнечной системы для точной доставки аппарата в любую ее точку [1, 2].

Чтобы в деталях изучить многие загадочные явления в кометах и установить связь вещества ледяных кометных ядер с реликтовым веществом протопланетного облака учеными и инженерами были разработаны, осуществлены и продолжают осуществляться космические миссии к ядрам периодических комет [3].

Первые космические миссии к ядрам комет Галлея и Джакобини—Циннера

Первыми космическими аппаратами, которые впервые в истории науки были отправлены в космическое пространство с целью пролететь вблизи ядра знаменитой кометы Галлея, были два советских космических корабля Вега-1 и Вега-2. Они стартовали с космодрома Байконур 15 и 21 декабря 1984 г. и сначала взяли путь в направлении к планете Венера, чтобы сбросить в ее атмосферу два научных зонда, а также с помощью ее гравитационного поля совершить маневр, который бы точно направил бы их в окрестности ядра кометы Галлея. Поэтому-то аппараты и получили название ВЕГА, что означало по первым двум буквам Венера и Галлей. Так все и произошло — оба аппарата успешно справились со своей задачей вблизи Венеры, получив новые результаты об ее атмосфере, а затем точно по расписанию 6 марта и 9 марта 1986 г. они пролетели вблизи ядра кометы — сначала Вега-1 прошла на расстоянии 9 000 км от ядра, а Вега-2 на расстоянии 3 000 км. При пролете на огромной скорости относительно ядра равной 77 км/с, Вегами, а затем и европейским аппаратом «Джотто», который с помощью Вег пролетел 14 марта 1986 г. на расстоянии 600 км от ядра, была впервые решена главная задача — фотографирование загадочного ядра кометы Галлея. Оно оказалось бесформенной гигантской монолитной глыбой размером $14 \times 10 \times 8$ км, массой около 300 млрд т, состоящей на 80 % из водяного льда с примесью органической и минеральной пыли и вращающейся с периодом 2.2 сут вокруг своей оси. Также ядро оказалось необыкновенно черным, отражающим всего 4 % солнечного света, и очень пористым — его плотность составляла около 0.1 г/см^3 . При каждом прохождении кометы Галлея вблизи Солнца ее ледяное с примесями ядро уменьшается на 6 м, т. е. за 30 ее датированных прохождений начиная с 12 г. до н. э. кометное ядро «похудело» на 180 м. А полностью оно растает примерно через 600—700 тыс. лет. Так впервые была решена загадка тысячелетий — что же представляют собой кометные ядра? Также были изучены физические характеристики газовой-пылевой атмосферы, плазменного хвоста и магнитного поля кометы. В получении этих данных большую роль также сыграли два японских аппарата Суисей (Комета) и Сакигаке (Пионер), которые исследовали далекие окрестности кометы, соответственно на расстояниях 151 000 км (8 марта 1986 г.) и 7 млн км (11 марта 1986 г.).

Однако первым космическим кораблем, который за полгода до триумфального пролета 5 космических кораблей вблизи ядра кометы Галлея сблизился с ядром кометы Джакобини—Циннера до расстояния в 10 000 км, стал Международный кометный исследователь (International Cometary Explorer — ICE), запущенный NASA, и который впервые измерил значение напряженности магнитного поля в плазменном хвосте этой кометы (100 нТл). Однако на его борту не было видеокамеры и о ядре этой кометы нам ничего не известно.

Миссия Дип Спейс 1 (Deep Space 1)

Космический аппарат Дип Спейс 1 22 сентября 2001 г. приблизился к короткопериодической комете 19P/Боррелли на расстояние 2 171 км и сфотографировал ее ядро. Качество полученных снимков ядра кометы Боррелли намного превосходили качество снимков ядра кометы Галлея, полученные в 1986 г. По форме ядро напоминало картофелину. Размеры ядра 8×3.5 км. На поверхности ядра видны разнообразные структуры, включая долины, горы и впадины. По всей поверхности ядра рассеяны темные участки. Гладкие равнины, на которых преобладают более светлые структуры, концентрируются в средней части ядра. С этими структурами, по-видимому, связано образование пылевых и газовых струй (джетов), которые пополняют своим веществом кому.

Миссия Стардаст (Stardust)

КА Стардаст стартовал с мыса Канаверал 7 января 1999 г., совершил три витка вокруг Солнца и 2 января 2004 г. пролетел на расстоянии 236 км от ядра периодической кометы Вильда 2. При этом сближении были получены наиболее детальные, из всех полученных ранее до этого пролета, изображения поверхности ядра кометы с высоким разрешением. Размеры ядра $1.65 \times 2.00 \times 2.75 \pm 0.05$ км. Альбедо 0.03 ± 0.015 .

На изображениях, полученных Стардастом, видны остроконечные пики высотой 100 м и кратеры глубиной более 150 м. Некоторые кратеры имеют круглые центральные впадины, окруженные неровным рядом выброшенного из недр ядра кометного вещества, тогда как другие кратеры имеют совершенно плоское дно и прямые стены. Диаметр самого большого кратера, получившего название «Левая ступня», равен 1 км, а это 1/5 всего 5-километрового ядра кометы Вильда 2. Другим большим сюрпризом было обилие (более 25)

и активность джетов частиц, вытекающих из различных участков поверхности ядра. Перед сближением предполагалось, что джеты должны выбрасываться на короткие расстояния от ядра, затем диссипировать, образуя светящееся гало вокруг ядра кометы Вильда 2. Вместо этого некоторые сверхскоростные джеты оставались узкими, как струя воды, вытекающая из мощного садового брандспойта. Эти джеты создали весьма серьезную обстановку для КА Стардаст во время его сближения с ядром кометы Вильда 2. Зонд Стардаст был совершенно изрешечен миллионами частичек в секунду при его пролете через три гигантских джета. 12 таких частиц, некоторые больше пули, проникли через верхний слой защитного экрана космического аппарата. В течение 6-летнего полета к ядру кометы Вильда КА Стардаст с помощью специальной ловушки, в ячейки которой были уложены блоки специального вещества низкой плотности — аэрогеля (состав такой же, как у стекла, но в 1 000 раз меньше плотности стекла), производил сбор межзвездного вещества, поток которого был обнаружен в Солнечной системе в направлении от созвездия Стрельца, и сбор кометных частичек вблизи ядра кометы Вильда 2. Частицы проникали в аэрогель, образовали треки, напоминающие головастиков, тормозились и застревали в аэрогеле вблизи треков. Пылинки также сталкивались с экраном из алюминиевой фольги, оставляя в нем следы в виде микрократеров. Капсула с кометными и межзвездными пылинками благополучно вернулась на Землю 15 января 2005 г. и была доставлена в исследовательскую лабораторию в Беркли (США). Сразу же после просмотра ячеек ловушки около 25 треков-«головастиков» было обнаружено невооруженным глазом в некоторых блоках аэрогеля. Сотни других частиц были найдены только с помощью специального микроскопа в Беркли, причем много частиц уже обнаружено любителями, которые подключились к поискам межзвездных и кометных частичек по программе Stardust@home. Анализ уже найденных в аэрогеле кометных частиц показал, что в каждой четвертой из частиц, изученных к настоящему моменту, присутствуют «высокотемпературные» минералы, такие, как форстерит и кальциево-алюминиевые включения (CAIs), которые формируются при температурах $> 1\,000^\circ\text{C}$. Также были найдены другие неожиданные «ингредиенты» — минералы, богатые титаном, и оливин. Но кометы формировались в холодных внешних областях ранней Солнечной системы, где мог существовать лед, и никогда не подвергались такому нагреву. А это значит, что их история куда более сложна, чем предполагалось ранее, и они представля-

ют собой смесь компонентов, сформированных в самых различных областях молодой Солнечной системы как на её периферии, так и вблизи её центра, в условиях очень высокой температуры. Вполне могут быть по крайней мере две возможности для появления «высокотемпературных» минералов в составе комет. Первая: существует гипотеза о сильном звездном ветре и мощных выбросах корональной плазмы молодого Солнца (проходившего стадию звезды Т Тельца), выдувавших во внешние области зарождающейся планетной системы капельки расплавов из центрального ее района. Вторая версия заключается в том, что данные минералы были сформированы около других звезд, и лишь потом, после странствий по Галактике, проникли и перемешались с веществом Солнечного протопланетного диска. Научный руководитель проекта Стардаст, профессор Дональд Браунли (Donald Brownlee) из университета Вашингтона, полагает, что детальный изотопный анализ этих минералов, вероятно, поможет выбрать одну из этих гипотез. КА Стардаст, с успехом выполнив свою главную программу, продолжает полет по гелиоцентрической орбите. Так как все его приборы продолжают функционировать, было предложено переориентировать его полет к комете Темпель 1 — главной цели миссии Дип Импект. Новая миссия Стардаста получила название Стардаст-Некст (Stardust-NEXT — New Exploration of Tempel). Одна из ее основных целей — сблизиться в 2011 г. с ядром кометы Темпель 1 и сфотографировать искусственный кратер на ее ядре, образовавшийся вследствие удара импактора Дип Импекта с ядром кометы Темпеля 1.

Миссия Дип Импект (Deep Impact)

КА Дип Импект стартовал с космодрома Кеннеди 12 января 2005 г. 3 июля 2005 г. зонд сблизился с короткопериодической кометой семейства Юпитера Темпеля 1 9P/Tempel 1 и с него был направлен на ядро кометы импактор, состоящий на 49 % из меди, на 24 % алюминия и на 25 % из других материалов, в том числе 6.5 кг неиспользованного гидразина (N_2H_4) [4]. 4 июля 2005 г. импактор на скорости 10.3 км/с врезался в ядро кометы Темпеля 1. Причем по мере сближения с ядром видеокамера, установленная на импакторе, передавала детальные изображения ядра вплоть до 4 с до столкновения. Пролетный модуль Дип Импект в это время приблизился к ядру кометы на 500 км и зафиксировал удар импактора по ядру кометы. Одной из главных целей пролетного модуля являлось получе-

ние четких изображений искусственного ударно-взрывного кратера на поверхности ядра кометы, образовавшегося вследствие удара импактора о ядро. К сожалению, при взрыве из внутренних областей ядра была выброшена огромное облако мелких льдинок с вкраплением пылинок, которое заэкранировало кратер, и пролетный модуль не смог сфотографировать этот новый кратер на ядре кометы Темпеля 1 и определить его диаметр и глубину. А это весьма важный результат, который позволял проверить реальность моделей многих исследователей, в том числе и разработанной в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Т. Г. Шевченко (Кручиненко, Чурюмов и Чубко) [5]. В рамках этой модели, основанной на идее Эпика об использовании закона сохранения импульса при движении импактора в поверхностном слое мишени [6], были выведены уравнения, связывающие диаметр D и глубину h искусственного кратера, плотность ρ и прочность на сжатие σ_p вещества поверхностного слоя кометного ядра с диаметром d и плотностью ударника δ с КА Дип Импект:

$$\frac{h}{d} = 1.785 \times \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{1/2} \times \left(\frac{V^2}{\sigma_p} \right)^{1/30} \times \cos(Z) \quad (1)$$

и

$$\frac{D}{d^{3/2}} = 1.20 \times \left(\frac{kV\delta}{h} \right)^{1/2} \times (\rho\sigma_p)^{-1/4}. \quad (2)$$

Здесь V — скорость ударника; Z — угловое зенитное расстояние траектории ударника; k — безразмерный коэффициент передачи радиального импульса. Подставляя в уравнения (1) и (2) скорость столкновения $V = 10.3$ км/с, плотность вещества импактора 7.0 – 8.9 г/см³, плотность вещества кометного ядра $\rho = 0.5$ – 1.0 г/см³, прочность вещества кометного ядра $\sigma_p = 10$ – 100 кН/м², эквивалентный диаметр сферического ударника $d = 43.0$ – 46.6 см, безразмерный фактор передачи импульса $k = 2.45$, из формулы (1) получаем, что глубина образованного кратера составит $h = 4.8$ – 5.6 м, а диаметр кратера, который определяется по формуле (2), будет равняться $D = 22$ – 57 м. С другой стороны, ученые команды «Дип Импект» полагают, что диаметр кратера должен быть $D \sim 110$ м и глубина $h \sim 27$ м, принимая при этом крайне низкое значение прочности вещества кометного ядра $\sigma_p = 65$ Н/м² (65 Па), что не представляется реальным, так как даже прочность рыхлых метеорных пылевых

шаров в атмосфере Земли (по Уипплу) составляет 1 кН/м^2 . Реальность той или иной модели может быть подтверждена КА Стардаст, который в 2011 г. сблизится с ядром кометы Темпеля 1 и сфотографирует искусственный кратер на нем, который должен находиться между двумя похожими друг на друга ударными кратерами на ядре кометы.

В спектре выброшенного из кратера вещества обнаружен цианид водорода HCN. Также предполагается наличие метилцианида (CH_3CN) в выброшенном из кратера веществе (пик на 4.40 мкм). На начальных стадиях выброса вещество было горячее 1000 К , на последней стадии выброса вещество имело температуру значительно меньшую. Скорость наиболее быстрых частиц в выбросе достигала 5 км/с . В начале выброса количество органики по сравнению с водой возросло.

На изображениях ядра и фрагментов его поверхности, полученных импактором Дип Импакта и покрывающих около 30% поверхности ядра, хорошо заметны несколько областей с разной морфологией. Поверхность ядра покрыта несколькими десятками кольцевых структур размерами от 40 до 400 м . Общее распределение этих структур по размерам и частоте этих структур согласуется с популяцией ударных кратеров, наблюдающихся на поверхностях других тел Солнечной системы. На поверхности ядра кометы Темпеля существуют две большие области с гладкой поверхностью (плато). Одна из гладких поверхностей ограничена с севера обрывом $\sim 20 \text{ м}$ высотой. Похожее плато с гладкой поверхностью наблюдалось также на ядре кометы Боррелли. Гладкие области и окружающие их обрывы могут указывать на слоистость строения ядра кометы Темпеля 1. В целом же вся поверхность ядра кометы Темпеля 1 довольно однородна по альбедо и цвету. Вариации альбедо лежат в пределах 50% от средней величины 0.04 . Никаких выходов льда или инея на ядре не было обнаружено, исходя из анализа альбедо или цвета. Была сделана оценка, что ядро кометы Темпеля 1 теряет 10^9 г вещества за одно прохождение через перигелий. С помощью инфракрасных наблюдений ($1.05\text{—}4.8 \text{ мкм}$) была построена температурная карта ядра, которая показывает вариации температуры на освещенной стороне от 260 ± 6 до $329 \pm 8 \text{ К}$. Температурная карта полностью соответствует топографии ядра: тени — это холодные области, а наиболее теплые области лежат вблизи подсолнечной точки. Период вращения ядра вокруг собственной оси равен $1.701 \pm 0.0014 \text{ сут.}$ ($40.832 \pm 0.33 \text{ ч}$). Форма ядра определена не полностью из-за малого периода вращения и

большой скорости пролетного модуля Дип Импекта. Размеры ядра 7.6×4.9 км. Эффективный радиус ядра кометы равен 3.0 ± 0.1 км. Средняя плотность ядра 0.6 г/см^3 .

КА Дип Импект продолжал свой полет по гелиоцентрической орбите и в декабре 2007 г. он пролетел вблизи Земли, где, получив гравитационный импульс, был переориентирован на пролет вблизи ядра короткопериодической кометы семейства Юпитера Бетина (85P/Boethin), мимо которого он пролетел в 2008 г.

Миссия Розетта (Rosetta)

КА Розетта стартовала 2 марта 2004 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) в направлении к ядру короткопериодической кометы Чурюмова—Герасименко (67P/Churyumov—Gerasimenko) [7]. Название миссии — это аббревиатура названия проекта на английском языке, которая удачно совпадает с названием древнего города Розетта, который находился в дельте реки Нил и вблизи которого французским капитаном армии Наполеона Пьером Бушаром 15 июля 1799 г. была найдена базальтовая плита или, иначе, знаменитый «розеттский» камень. На нем сохранились записи одного и того же текста на трех языках: древнеегипетском (иероглифами), коптском (египетском демотическим шрифтом) и древнегреческом. Коптский и древнегреческий языки знали хорошо, и это дало возможность впервые Томасу Янгу и Жану Франсуа Шампольону в 1822 г. расшифровать древнеегипетские иероглифы, что позволило открыть всему миру интереснейшую историю древнего Египта. Эти три текста были нанесены на плиту в 196 г. до н. э. и представляли собой благодарственную надпись египетских жрецов царю Птолемею V Епифану, который руководил Египтом в 204—180 гг. до н. э. Розеттский камень сохраняется в Лондоне в Британском музее. Символическое название миссии Розетта и состоит в том, что ядро кометы Чурюмова—Герасименко, после посадки на него посадочного модуля, который доставит космический аппарат «Розетта», сыграет своеобразную роль «розеттского» камня для расшифровки тайн ледяных кометных ядер — носителей загадочного реликтового вещества Солнечной системы, а от них прямой путь к решению фундаментальной проблемы космогонии Солнечной системы и происхождения жизни на Земле.

Как же была открыта комета, которой суждено стать «розеттским» камнем? Летом 1966 г. кафедра астрономии Киевского госу-

дарственного университета имени Т. Г. Шевченко снарядила и отправила первую кометную экспедицию в Таджикистан на гору Санглок с целью наблюдений и поисков комет как фотографическими, так и визуальными способами. В 1968 г. Вторая кометная экспедиция КГУ проводила наблюдения и поиски комет в Туркменистане на горе Душак. А в 1969 г. мы со Светланой Ивановной Герасименко, которая тогда была аспирантом профессора С. К. Всехсвятского, в составе Третьей кометной экспедиции КГУ отправились в Казахстан в Алмаатинскую обсерваторию астрофизического института имени академика АН СССР В. Г. Фесенкова. Нас привлек имеющийся там светосильный 0.5 метровый менисковый максутовский рефлектор. С его помощью мы организовали патрулирование нескольких короткопериодических комет семейства Юпитера, отсняли много фотопластинок и выполнили их исследования. На пяти снимках мы нашли диффузный объект, который сначала приняли за периодическую комету Кома—Сола, которую мы и снимали на эти же пластинки. Позднее, когда мы вернулись из экспедиции в Киев, то выяснили, что этот объект по координатам отличается на 2 градуса от теоретического положения кометы Кома—Сола. Это вызвало у нас удивление и мы начали искать таинственный объект на других снимках. И еще на четырех снимках, почти на самом краю пластинок, обнаружили этот же объект. Пять его точных положений, определенных по снимкам, давали возможность точно вычислить орбиту кометы. Она оказалась эллиптической и принадлежала до сих пор неизвестной короткопериодической комете с периодом 6.5 лет. О нашем открытии мы сообщили в Центральное бюро астрономических телеграмм в США доктору Б. Марсдену, где фиксируются открытия объектов во Вселенной и Солнечной системе. Через несколько дней нам пришло сообщение, что это действительно новая комета и ее зарегистрировали как комету 1969h или комету Чурюмова—Герасименко. Сейчас эта комет имеет постоянный номер 67P во всех каталогах комет (комета Галлея имеет номер 1P). С момента открытия эта комета уже возвращалась к Земле 7 раз. Перед ее седьмым появлением вблизи Солнца к комете отправлен КА «Rosetta», который достигнет ее ядра в 2014 г. И вместе с ним комета пройдет перигелий в восьмой раз в 2016 г. Интересной оказалась и динамическая история кометы 67P, т. е. эволюция ее орбиты в прошлом. Оказалось, что за 10 лет до открытия в 1959 г. комета прошла от Юпитера на очень близком расстоянии в 0.05 а. е. или 7.5 млн км, что существенно трансформировало все элементы ее орбиты и главным образом перигелийное

расстояние, которое до этого сближения превышало 2.5 а. е., а после сближения уменьшилось до 1.3 а. е. Именно после такого заметного изменения орбитальных элементов комета стала доступной для фотографических наземных наблюдений с телескопами, благодаря чему, попав в поле зрения нашего менискового телескопа в Алма-Ате, и была открыта мной и Герасименко. В 2003 г. с космического телескопа Хаббла была получены серия изображений кометы 67Р, на основании которых было построено модельное изображение ядра кометы (рис. 1). В плане комета имеет форму креста, а в других проекциях напоминает шляпу. Размер ядра 5×3 км, а период вращения вокруг собственной оси 12 ч, т. е. сутки на комете составляют половину земных суток.

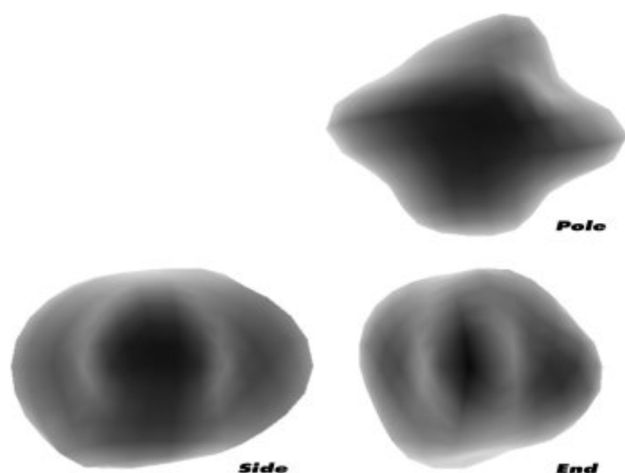


Рис. 1. Ядро кометы 67Р/Чурюмова—Герасименко по данным наблюдений с помощью телескопа Хаббла в 2003 г.

Сейчас Розетта совершает свой второй виток по околосолнечной орбите, пролетев в марте 2005 г. вблизи Земли и получив от нее первый гравитационный импульс, 26 марта 2007 г. пролетела над Марсом на высоте 240 км, получив от него второй ускоряющий гравитационный импульс, а в октябре 2007 г. пролетела вблизи Земли,

получив от нее третий гравитационный импульс и направились к Солнцу. При пролете вблизи Марса приборы Розетты провели детальное картографирование поверхности Марса, измерения его магнитного поля и другие исследования.

Обогнув Солнце, Розетта 5 сентября 2008 г., находясь в главном поясе астероидов, приблизилась на 240 км к астероиду Штейнс (№ 2867) и передала на Землю его изображения и другие научные данные о нем. Эта малая планета 2867 была открыта 4 ноября 1969 г. Николаем Степановичем Черныхом в Крыму и названа в честь известного латышского астронома профессора Карла Августовича Штейнса — специалиста по космогонии комет. Удивительная случайность: космический аппарат, летящий к ядру кометы, сблизился с астероидом, названным в честь астронома — специалиста по космогонии комет! Двигается по эллиптической орбите с большой полуосью $a = 2.36$ а. е., эксцентриситетом $e = 0.146$ и наклоном $i = 9.9^\circ$. Предварительные результаты, переданные с «Розетты», таковы: размеры: 5.9×4 км (эквивалентный эффективный диаметр около 5 км). Форма: огранный бриллиант. Альбеда 0.35 [8]. Кратеры: доминирует большой кратер на северном полюсе диаметром ~ 2 км; второй большой кратер находится в районе тени; цепочка из 7 кратеров тянется от южного полюса к северному; общее число кратеров 23 с диаметрами более чем 200 м.

Возвращаясь из пояса астероидов к Солнцу, Розетта в ноябре 2009 г. вновь пролетит вблизи Земли и, совершив свой четвертый гравитационный маневр, перейдет на окончательную орбиту полета к комете Чурюмова—Герасименко. Обогнув в третий раз Солнце, Розетта 10 июля 2010 г. пролетит вблизи крупного астероида Лютеция (№ 21) диаметром 99 км и сфотографирует его. Астероид 21, Лютецию, открыл 15 ноября 1852 г. Г. Гольдшмидт. Он движется по эллиптической орбите с большой полуосью $a = 2.43$ а. е., эксцентриситетом $e = 0.163$ и наклоном $i = 3.1^\circ$. Такой крупный астероид будет исследоваться с помощью КА впервые.

После пролета вблизи Лютеции все приборы Розетты будут переведены в «спящий» режим почти на 4 года до подлета к ядру кометы Чурюмова—Герасименко. В мае 2014 г. Розетта снизит свою скорость относительно ядра кометы до 2 м/с, приблизится к нему на расстояние 25 км и перейдет на орбиту искусственного спутника ядра кометы Чурюмова—Герасименко. Все приборы Розетты будут «разбужены» и приведены в полную готовность, чтобы начать систематические исследования ядра и околоядерной области кометы.

В это время будет проведено полное и детальное картографирование поверхности ядра кометы, которое позволит впервые в мире построить детальный «глобус» ядра кометы. Подробный анализ рельефа ядра кометы даст возможность выбрать пять площадок на его поверхности для безопасной посадки спускаемого модуля Филы. В ноябре 2014 г. будет проведен самый сложный и главный этап всей миссии Розетта — отделение от орбитального модуля спускаемого зонда «Филы» и посадка его на одну из почти выбранных для этой цели безопасных площадок на ядре кометы. При этом будет включен двигатель на Филах, который погасит скорость зонда до величины меньше 1 м/с. Филы совершит мягкую посадку сперва на одну из трех его ножек, затем обопрется и на две другие ножки, когда они коснутся кометного грунта. При касании второй ножки из зонда выдвинется специальный гарпун, который, проникнув в кометный грунт, закрепит модуль Филы на кометном ядре и сделает его положение надежно устойчивым. После закрепления Филы на кометном ядре девять приборов, установленных на нем, по команде с Земли будут расчехлены и приступят к главной задаче миссии — комплексному исследованию загадочного реликтового вещества кометного ядра и Солнечной системы.

Филы — это уникальный научный контейнер массой около 21 кг. На нем установлено 9 приборов: спектрометр альфа-лучей, протонов и рентгеновских лучей (АРХ) для исследования элементного состава кометного вещества; газохроматограф и масс-спектрограф КО-ЗАК и МОДУЛУС/ПТОЛЕМЕЙ для исследования химического состава, изотопного состава и идентификации сложных органических молекул в кометном веществе; СЕЗАМ для акустического исследования вещества поверхностного слоя ядра, измерения диэлектрических свойств среды, окружающей ядро, и мониторинга столкновений с пылевыми частицами; МУПУС для изучения физических свойств вещества кометы; КОНЦЕРТ для исследования электрических характеристик всего ядра и его внутренней структуры; РОМАП для исследования кометного магнитного поля и его взаимодействия с солнечным ветром; СИВА для получения изображений рельефа ядра в месте посадки Филы и РОЛИС для обеспечения бурения кометного грунта и исследования вещества, которое находится под поверхностным слоем ядра, для изучения распределения и величины электрических зарядов на ядре и в образцах кометного грунта, который будет помещен в специальный коллектор.

На орбитальном модуле Розетте будут работать следующие приборы: ОЗИРИС, АЛИСА, ВИРТИС, МИРО — для получения дистанционным путем прямых изображений поверхности ядра и спектральных исследований ядра и околоядерной области; РОЗИНА, КОЗИМА, МИДАС — для анализа химического состава кометного вещества, КОНЦЕРТ — для исследования крупномасштабной структуры ядра совместно с аналогичным прибором, установленным на Филах, ГИАДА — для исследования потока пыли и распределения пылевых частичек по массам, РПС — для исследования кометной плазмы и ее взаимодействия с солнечным ветром, РСИ — для исследования кометы с помощью радиоволн. С модуля Филы научные данные, полученные каждым из его 9 высокоточных и чувствительных приборов, будут передаваться на орбитальный модуль Розетту, а оттуда с помощью радиотелескопа вместе с данными, полученными 11 приборами Розетты, вся научная информация будет передаваться на Землю.

Для питания приборов космической орбитальной лаборатории будет использоваться солнечная батарея площадью 32 м². С помощью 2-м антенны радиотелескопа, установленного на Розетте, впервые в истории науки будут поступать в научные лаборатории на Земле уникальные данные о реликтовом веществе Солнечной системы. Многие ученые считают, что это эксперимент тысячелетия, а по количеству израсходованных на него средств — большее одного миллиарда евро — это будет наиболее дорогой эксперимент в истории науки, но «игра стоит свечей». Без всякого сомнения, это самая грандиозная кометная миссия, уникальный эксперимент в истории человеческой цивилизации. Через 5 лет наши представления о природе комет и модель кометного ядра будут существенно улучшены и практически адекватны всей совокупности как наземных, так и космических наблюдений. С нетерпением будем ждать 2014 года!

Список литературы

1. *Чурюмов К. И.* Кометы и их наблюдение. — М.: Наука, 1980.
2. *Беляев Н. А., Чурюмов К. И.* Комета Галлея и ее наблюдение. — М.: Наука, 1985.
3. *Чурюмов К. И.* Космические миссии к ядрам комет — от Вегдо Розетты // Физика космоса: Тр. 35-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2006 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. — С. 197—209.
4. *Belton M. J. S.* A Deep Impact Mission Contribution To The Internal Structure Of Jupiter Family Cometary Nuclei: The Talps or «Layered Pile» Model. — <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2006/pdf/sess453.pdf>.
5. *Churyumov K., Kruchynenko V., Chubko L.* The Size of the Artificial Explosive Crater on the Nucleus of Comet 9P/Tempel 1. — www.springerlink.com/index/00227kn7g0k8667u.pdf.
6. *Öpik E. J.* Researches on the physical theory of meteor phenomena. I. Theory of the formation of meteor crater // Tartu Obs. Publ. — 1936. — Vol. 28, iss. 6. — P. 27.
7. *Churyumov K.* Discovery, observations and investigations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in Kyiv // The New Rosetta Targets. Observations, Simulations and Instrument Performances / Ed. by L. Colangeli, E. Mazzotta Epifani, & P. Palumbo: Astrophysics and Space Science Library. — Vol. 311. — 2004. — P. 1—4020.
8. *Fornasier S., Belskaya I., Fulchignoni M. et al.* First albedo determination of 2867 Steins, target of the Rosetta mission // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 449. — P. L9—L12. arXiv:astro-ph/0602631.

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ: РАБОТА ДЛЯ АСТРОНОМОВ!

Астероидно-кометная опасность (АКО), т. е. угроза столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы — весьма серьезная научная проблема, да и не только научная. На рубеже 20—21-го вв. произошла существенная переоценка её значимости. Долгое время проблема АКО была предметом изучения для узкого круга специалистов, но теперь она осознается гораздо более широко как комплексная глобальная проблема, стоящая перед человечеством. Причина такого драматического изменения состоит в том, что накопилась некоторая критическая масса фундаментальных знаний о населенности Солнечной системы малыми телами, о динамической и физической эволюции этого населения, в частности, о механизмах пополнения популяции опасных тел, о частоте столкновений малых тел с планетами, в особенности с Землей, о возможных последствиях столкновений и так далее.

Проблема АКО имеет очень важный для всех астрономов аспект общечеловеческого характера. Мне не раз приходилось дискутировать на тему «какую конкретную пользу приносит астрономия народу?», причем чаще всего спрашивает об этом не народ, а люди, власть и деньги имущие, и чиновники, изгоняющие астрономию из системы образования (это отдельная, большая тема). Для них и для всех моих коллег (им ведь тоже приходится участвовать в подобных дискуссиях) я хочу специально выделить тезис: Астрономия — ключевая наука для решения глобальной проблемы астероидно-кометной опасности, реальность которой уже не может вызывать сомнений. Это, конечно, не основной аргумент в пользу развития астрономических исследований и поддержки распространения астрономических знаний в обществе, но он весьма конкретный.

По своей сути проблема АКО — комплексная. Выделяют ее следующие основные составляющие:

- проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел и определения их свойств;
- проблема противодействия и уменьшения ущерба;

- проблема кооперации в подходе к глобальной проблеме АКО.

Комплексность проблемы предполагает комплексный же подход к ее решению, затрагивающий политику, как внешнюю так и внутреннюю, технологию в широком смысле этого слова, в том числе и военного применения, социальную сферу, науку — в общем, многие компоненты человеческой цивилизации. Особенно велика роль и ответственность фундаментальной науки, прежде всего астрономии и геофизики.

Основная цель этой лекции — познакомить читателя (прежде всего, астронома, физика) с тем, что делается в России для решения проблемы АКО. Предполагается, что основные понятия и общие сведения по проблеме читатель получил ранее (например, из [1, 2]). Поэтому здесь рассмотрены (по необходимости кратко) лишь некоторые новые элементы. В лекции, имеющей кроме научного и определенный публицистический посыл, выделены задачи, стоящие перед специалистами-астрономами и отмечены перспективы развития этих исследований в России.

Следует отметить, что в последнее время в России руководство страны стало обращать на проблему АКО определенное внимание. Так, во время визита 5-го июня 2009 г. на Звенигородскую обсерваторию Института астрономии РАН (ИНАСАН) Председатель Совета Федерации С. М. Миронов, говоря об этой опасности, подчеркнул:

«Космонавты, побывав на орбите, мне рассказывали, насколько хрупка и беззащитна наша планета. А перед такой серьезной космической опасностью, как попадание астероида или крупного метеорита, мы все равны и все страны должны в одинаковой мере пытаться найти возможности решения потенциальных проблем. И Россия не находится от этого в стороне, мы свои сектора изучаем внимательно. И это подтверждает необходимость совместной международной работы. Это угроза не какой-то отдельной стране, а всему человечеству. Ведь неизвестно, где может произойти столкновение, а катастрофическими последствия будут для всех».

Определенное внимание к обсуждаемой проблеме проявляют в Администрации Президента РФ и в Совете Безопасности РФ. Хорошим знаком является то, что в 2010 г. планируется рассмотрение проблемы АКО на коллегии Научно-технического совета Роскосмоса. К таким событиям надо готовиться. Поэтому в лекции осо-

бое внимание уделено перспективам развития внутрироссийской (и международной) кооперации. Описан проект Федеральной целевой научно-технической программы «Система астероидно-кометной безопасности России», в разработке которого активное участие принимают российские астрономы.

Главная задача фундаментальной науки в проблеме АКО

Надежная оценка степени риска — главный результат, который обязана дать наука, занимающаяся проблемой АКО. Можно говорить о двух видах рисков — усредненный (по большому интервалу времени) риск, и риск, возникающий в конкретном случае сближения с угрожающим телом. Как показывают расчеты (см. например [3]), усредненный уровень риска, связанного с АКО относительно невелик. По крайней мере, среднее ежегодное количество жертв автокатастроф, землетрясений, цунами, пожаров и так далее выше оцениваемого среднего ежегодного для катастрофических столкновений с малыми телами. Катастрофы приводят к серьезным последствиям, но происходят редко. Степень усредненного риска является аргументом при обсуждении распределения средств, выделяемых по отдельным долгосрочным проектам научных исследований различных угроз, стоящих перед страной. Этот долгосрочный и регулярный вид планирования может поддерживаться при умеренном уровне затрат. А вот другой вид риска, а именно риск конкретного угрожающего события (столкновения), может потребовать принятия незамедлительных и весьма затратных решений. Конечно, эти решения будут принимать не ученые, а правительства или даже международные органы, такие как ООН, но именно ученые определяют степень риска конкретного столкновения. Этот риск определяется двумя факторами — вероятностью столкновения и тяжестью последствий столкновения с данным телом. Здесь особенно важно соблюсти меру. Завышение степени риска, например, в случае возможного столкновения с астероидом Апофис в 2036 г., может означать огромные напрасные затраты, которые придется понести для того, чтобы провести переселение большого количества людей, закрытие или перенос производств и так далее. Недооценка риска может принести еще большие потери, если столкновение все-таки произойдет. Вывод совершенно очевиден — нужно иметь надежную методику, позволяющую адекватно оценивать степень риска.

В средствах массовой информации часто упоминается Туринская шкала угрозы, а в научной литературе — Палермская шкала. В Туринской шкале, учитывающей кинетическую энергию угрожающего тела и вероятность его столкновения с Землей, насчитывается 11 степеней риска. Степень риска 0 означает, что нет никакой угрозы, т. е. столкновение либо не произойдет вообще, либо тело настолько мало, что столкновение неопасно. Степени 8—10 означают неизбежное столкновение и катастрофу — от локальной (степень 8) до глобальной (10). Шкала напоминает принятую в ряде стран шкалу степени угроз государственного масштаба («оранжевая», «красная» и так далее). Палермская шкала считается более профессиональной и детальной, чем Туринская. Палермская шкала является десятичным логарифмом относительного риска, определяемого с учетом вероятности столкновения для конкретного случая, времени до ожидаемого события, числа столкновений в год с энергией не менее заданной и так далее

Несколько упрощая, можно сказать, что за надежную оценку этих факторов риска отвечают две фундаментальные науки: астрономия, в частности, наблюдательная астрономия — за выявление опасных тел, небесная механика — за оценку вероятности столкновения, и геофизика вкупе с науками экономического и социального направлений — за оценку последствий столкновений.

Итак, для оценки риска конкретного столкновения нужно:

- обнаружить опасное тело;
- получить (рассчитать) надежную оценку вероятности конкретного столкновения;
- рассчитать возможные последствия столкновения.

Первые две задачи решаются методами астрономии, третья — методами физики (геофизики).

Обнаружение и мониторинг опасных тел. Российские перспективы

Перед наблюдательной астрономией в плане решения проблемы АКО стоит несколько задач. Очевидно, что необходимо развивать средства и методы наблюдений (как обнаружения так и мониторинга) опасных тел. С помощью этих средств необходимо выявить (обнаружить) все достаточно крупные астероиды и кометы, определить

их орбиты, выделить потенциально опасные объекты (ПОО), постараться максимально точно определить параметры их движения и затем улучшать их по мере поступления новых данных, выяснить физические и другие свойства ПОО тел и так далее. Это даст возможность своевременно определить, какие из небесных тел могут стать угрожающими космическими объектами, и оценить вероятность их столкновения с Землей. В современной трактовке задача обнаружения должна рассматриваться именно как задача оперативного и массового (исчерпывающе полного) выявления опасных тел (размером 100 м и более). Последующие регулярные наблюдения таких объектов (мониторинг) должны обеспечить уточнение их орбит и максимально полное исследование их физических свойств. Тем самым появляется возможность предсказать столкновение достаточно крупного тела с Землей за много лет, и дать необходимую информацию для того, чтобы человечество могло заблаговременно принять соответствующие меры.

Проведенное в лекции [1] сравнение числа обнаруженных и оценки числа пока необнаруженных ПОО размером около 100 м хорошо показывает, что на данный момент мы еще не обладаем наблюдательными технологиями, позволяющими заблаговременно обнаруживать тела такого размера в массовом порядке. Поэтому нужно быть готовым и к решению задачи обнаружения опасных космических объектов на подлете к Земле. Космические объекты, имеющие размеры менее ста метров могут быть доступны для наблюдений только в достаточно близких окрестностях Земли. При этом не исключено, что объект, угрожающий столкновением с Землей, может быть обнаружен лишь за один-несколько месяцев до падения его на Землю. Переходя к еще меньшим объектам декаметрового размера (Тунгусское тело), следует помнить, что время подлета после обнаружения исчисляется сотнями — десятками часов.

Поиск движущихся опасных объектов — сложная задача. Ее решение потребует организации патрулирования всего неба, но при этом с поверхности Земли принципиально не удастся обнаружить те тела, которые движутся со стороны Солнца и которые не видны на ярком фоне дневного неба. Кроме того, большое значение имеет и погодный фактор. Поэтому наиболее полное решение проблемы обнаружения большинства потенциально опасных небесных тел может быть получено лишь с привлечением специальных космических средств наблюдения.

В лекции [1] были кратко описаны существующие и проектируемые за рубежом средства обнаружения ПОО. За прошедшие два года продвинулись в этом направлении и российские специалисты. Наиболее перспективным представляется проект широкого-угольного телескопа АЗТ-33ВМ Института Солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН [4]. Его параметры лишь немного уступают параметрам телескопов проекта серии Pan-STARRS (the Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System — [http : //pan — starrs.ifa.hawaii.edu/public/](http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/)) (США). В настоящее время пробный телескоп PS1 этой серии является единственным работающим действительно современным инструментом. Создаваемый телескоп АЗТ-33ВМ при поле зрения около 3 градусов и диаметре главного зеркала 1.6 м будет способен обнаруживать объекты 24-й звездной величины за 2-минутную экспозицию. Главная трудность, которая видится сейчас — создание (получение) мощного узла преамплиц излучения, подобного тому, что используется в проекте Pan-STARRS. В ИСЗФ имеется задел, поскольку специалисты института и промышленности создали и уже ввели в действие близкий по конструкции инфракрасный телескоп. Поэтому для нового телескопа есть базовый проект и даже изготовлены некоторые конструкции телескопа. На завершение работ необходимо около 300 млн рублей, в десятки раз меньше того, что затрачено и планируется затратить в проекте Pan-STARRS, но все-таки это достаточно внушительная сумма для фундаментальной науки и без централизованной поддержки создать первый российский телескоп такого уровня вряд ли возможно.

Уже обнаруженные объекты можно успешно изучать с существующими астрономическими телескопами (т. е. проводить в режиме постоянного наблюдения-мониторинга уточнение орбиты, и исследование физических свойств объектов). Разумеется, при этом предполагается, что вся исходная информация об обнаруженных специальными инструментами опасных объектах будет доступна астрономам.

Вклад российских обсерваторий в решение задач мониторинга и выявления характеристик опасных тел пока не так велик, но все-таки заметен. Он в первую очередь выражается в обнаружении новых астероидов и комет (хотя доля эта мала), проведении исследований физических свойств АСЗ, что весьма важно для планирования возможных методов противодействия столкновению, а также в слежении за уже открытыми объектами и исследовании источников их пополнения. Более или менее регулярные наблюдения АСЗ в настоящее время проводятся только в Пулковской обсер-

ватории на автоматизированном телескопе диаметром 32 см. Эпизодические наблюдения АСЗ выполняется в других обсерваториях, например специалистами Казанского государственного университета на телескопе РТТ-150 Российско-турецкой обсерватории близ г. Анталя, на пике Терскол с помощью телескопа Цейсс-2000 Международного (российско-украинского) исследовательского центра, в САО РАН и на инструментах сетей, предназначенных, в основном, для проведения исследований по другой тематике, например, сеть «Мастер» ГАИШ МГУ, создаваемая для исследования источников гамма-вспышек, сеть «ИСОН (Пулкон)», создаваемая ИПМ РАН, МАК «Вымпел», ГАО РАН и другими организациями, для обнаружения и мониторинга космического мусора. Проблема использования этих сетей для задач мониторинга опасных объектов не столько техническая (хотя и это есть), а организационная. Пока не создан организационный «интерфейс», позволяющий использовать эти сети в режиме службы (а решение задач обнаружения и мониторинга в проблеме АКО требует создания именно службы, т. е. регулярного и стандартизированного режима работы вовлеченных наблюдательных средств).

Важной, но трудноосуществимой задачей является создание эффективной системы обмена информацией с существующими пунктами контроля космического пространства. Системы, подобные системе «Окно», расположенной в Таджикистане или Алтайскому лазерному центру, в принципе, могут давать существенную информацию для решения задач по проблеме АКО, но они имеют предназначение для решения задач по линии Министерства обороны и пока что необходимые организационные «интерфейсы» для обмена информацией по «гражданской» тематике АКО и здесь не разработаны.

Оценка вероятности столкновения

Здесь ограничусь лишь очень общими замечаниями. Наука о движении небесных тел — небесная механика — объясняет возможность проникновения отдельных астероидов внутрь орбиты Земли и, в общем, позволяет оценить как количество опасных объектов, так и частоту столкновений их с Землей. Движение этих тел тщательно рассчитывается, с тем, чтобы оценить вероятность действительно угрожающих сближений. Конечно подходы классической небесной механики, прошедшие проверку в течение столетий, используются в полном объеме, но даже в этой области возможны очень существенные

нововведения как учет тонких физических эффектов, так и дальнейшее развитие теоретических и вычислительных методов. Пример — сравнительно недавний «бум», связанный с массовым осознанием существенности эффекта Ярковского для эволюции орбит астероидов. Еще одна тема — так называемые зоны резонансного возврата, стала особенно актуальной в связи с исследованиями эволюции орбит малых тел в результате близких прохождений в окрестности планеты и последующих столкновений с ней малых тел. Весьма сложна задача расчета орбит комет из-за множества дополнительных плохо рассчитываемых негравитационных факторов (например, нереально с высокой точностью рассчитать действие газовых потоков, уходящих из ядра испаряющейся кометы, на движение ядра). Эти соображения относятся к орбитам как короткопериодических комет, так и долгопериодических. Появление последних в настоящее время вообще практически непредсказуемо. Долгопериодические кометы обнаруживаются, в лучшем случае, лишь за несколько месяцев-год до их появления в окрестности Солнца. Типичный пример: комета C/1983 H1 (IRAS—Araki—Alcock) с орбитальным периодом 963.22 г., открытая 27 апреля 1983 г., уже через две недели (11 мая 1983 г.) пролетела мимо Земли на расстоянии 0.0312 а. е. Кроме того, такие кометы имеют большую скорость относительно Земли.

Нельзя сказать, что с астероидами все обстоит намного лучше. Например, вероятность столкновения с тем же Апофисом в 2036 г. оценивается по разным моделям от 10^{-5} до 10^{-12} (по материалам выступлений на конференции «Околоземная астрономия — 2009»). Дело в том, что для надежного и заблаговременного прогнозирования нужны и гораздо более точные и равномерно распределенные наблюдения, очень детальные физические модели и конечно надежные алгоритмы. Работы в этом направлении немало.

Кооперация в подходе к глобальной проблеме АКО

Прежде всего, отметим, что проблема АКО отражена в законодательных актах некоторых стран. Так в США координирующую роль в части задач обнаружения и оповещения государство поручило НАСА. Согласно Закону 2008 г. об уполномочении НАСА (NASA Authorization Act of 2008) это агентство уполномочивается:

- обеспечить подготовку космической миссии с целью изучения

астероида Apophis, и космической миссии среднего класса с целью выявления объектов размером более 140 м, сближающихся с Землей;

- в течение 2 лет после даты вступления в силу настоящего Закона, администратор (директор) НАСА разработать политику для уведомления Федерального агентства и соответствующих учреждений в чрезвычайных ситуациях, обусловленных угрозой столкновения, рекомендовать Федеральное агентство или агентства, которые будут отвечать за защиту Соединенных Штатов от околоземных объектов;
- директор НАСА должен поддерживать деятельность радаров Голдстоун и Аресибо;
- НАСА должно пытаться развивать сотрудничество с другими странами со значительными ресурсами для проведения совместных программ обнаружения и каталогизации;

Специфика проблемы активного противодействия состоит в том, что она не может решаться одной страной или группой стран. Это международная проблема, затрагивающая интересы всех стран, которая может быть решена лишь при наличии международного соглашения в отношении предпринимаемых действий. Особенно чувствительным вопросом является применение ядерных взрывов как инструмента противодействия. Сегодня на вывод ядерного оружия в космос существует запрет. Но в некоторых ситуациях без этого инструмента при современном уровне технологий обойтись нельзя. Можно указать и на ряд других причин, по которым оказание активного противодействия падению космических тел должно стать предметом международного соглашения.

Как уже отмечалось, пока обнаружена лишь очень малая доля потенциально опасных объектов. Опираясь на эти неполные данные, в качестве первичной статистической оценки можно принять, что несколько процентов от этого общего количества составят тела, имеющие ненулевую вероятность столкнуться с Землей в текущем столетии. Эти ненулевые вероятности очень малы, обычно порядка одного шанса на сто тысяч, но несколько сотен астероидов будут достаточно опасными, чтобы вызвать беспокойство, а несколько десятков потребуют принятия мер для противодействия. Естественно, что гораздо больше астероидов будут лишь только угрожать падением, чем действительно сталкиваться с Землей. По-видимому, решение об уходе (разрушении) приближающегося астероида придется принимать,

когда вероятность падения будет неприемлемо высокой. Это понятие «неприемлемо высокая вероятность» — довольно расплывчатое (критерии здесь пока не выработаны!). Но все же представляется (по мнению зарубежных экспертов), что если вероятность падения тела, способного уничтожить небольшую страну или крупный город, равняется, скажем, одному шансу из 100, то вряд ли земляне отнесутся к этому пассивно. Если сохранить этот критерий «приемлемости», то легко оценить, как часто придется принимать решения. Поскольку астероиды размером 100 м падают на Землю в среднем не реже чем раз в 1000 лет, то решение о принятии мер по его отклонению, уничтожению и/или по уменьшению ущерба в среднем придется принимать не реже чем раз в десять лет. По-видимому, уже в течении ближайших 10—15 лет Организации Объединенных Наций и ее компетентным органам придется принимать решения о мерах по предотвращению грозящих нам из космоса ударов. Для этого необходимо наличие эффективных средств поиска опасных тел и свободный обмен полученной с помощью этих средств научной информацией. Также должны иметься средства для оповещения общественности об астероидной опасности. Для предотвращения грозящего удара должна быть согласована и задействована под эгидой ООН международная процедура принятия решений.

В 2002 г. при Комитете ООН по мирному использованию космоса была образована Группа действия 14 (Action team 14), задачей которой стала координация усилий разных стран по решению проблемы АКО. В группе работают представители Австрии, Великобритании, Германии, России, США, Франции, Южной Кореи и других стран. Отчеты и другие материалы группы, размещенные на сайте ООН, отражают значительный прогресс в организации работ по проблеме АКО.

Задачей группы является обмен информацией об активности разных стран по тематике АКО, а на данный момент главная задача — завершение подготовки документа, инициирующего работу органов ООН по выработке и принятию общего соглашения. Соглашение должно регламентировать процедуру принятия решений по этому чувствительному для всех стран вопросу.

В России в течение последних 15 лет развивается инициативное движение по изучению и подготовке к решению проблемы АКО. В нем участвуют представители научных учреждений РАН, высших учебных заведений, предприятий космической индустрии и оборонного комплекса. Был проведен ряд совещаний (конферен-

ций) всероссийского масштаба, на которых подчеркивалась необходимость создания координационного органа в масштабах страны. В феврале 2007 г. при Совете РАН по космосу была создана «Экспертная рабочая группа по проблеме астероидно-кометной опасности». В нее вошли представители научных учреждений РАН, высших учебных заведений, Роскосмоса, МЧС, Росатома, Министерства обороны и других заинтересованных ведомств и организаций. Материалы Экспертной группы представлены на сайте: [http : //www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard/](http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard/).

Тема АКО вызывает большой резонанс в российском обществе. К сожалению, общественная активность рождает недостаточно выверенные с профессиональной точки зрения предложения, направляемые во властные уровни страны. Экспертная группа выполняет анализ таких обращений. Однако, основная задача группы — разработка проекта Федеральной целевой научно-технической программы (ФЦНТП) «Система астероидно-кометной безопасности России».

В рамках ФЦНТП «Система астероидно-кометной безопасности России» предлагается осуществление следующих (под)проектов.

1. Взаимодействие (Кооперация)

Решаемые задачи: Организация информационного взаимодействия министерств, ведомств и организаций в России и взаимодействия с международной кооперацией по данной проблеме. Понятно, что в организационном плане этот проект - главный. Он охватывает все другие (под) проекты. Высокий уровень координации означает, что она должна быть поручена одной из структур государственного управления.

2. Обнаружение и мониторинг опасных небесных тел

Решаемые задачи: Создание национальной скоординированной системы обнаружения и мониторинга объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ) и повышение ее эффективности за счет интеграции в международную систему. Координация и поддержка работ по определению и уточнению физических характеристик опасных тел, параметров их движения.

3. Характеристики опасных небесных тел и оценка рисков

Решаемые задачи: Надежные определение вероятности конкретных столкновений. Оценка последствий конкретных столкновений. Выработка научно обоснованной оценки степени риска. Выдача оценки степени риска в уполномоченные государственные органы. Это главная задача подпроектов (2) и (3) и на данный момент решение именно этой задачи представляет наибольший при-

оритет. Ее предлагается решать путем создания Информационно-аналитического центра по проблеме АКО.

4. Космические миссии

Решаемые задачи: Разработка космических аппаратов для проведения исследований потенциально опасных космических объектов «на месте» (проект «Апофис» и возможно поисковый космический телескоп), а также отработка способов противодействия.

Комментарий: Практически все проекты так или иначе связаны с применением средств космического базирования. В первую очередь это относится к (под)проектам (2) и (5). Но поскольку в нашей стране осуществление практически всех космических миссий проводится в рамках Федеральной космической программы (ФКП) разумно выделить космические миссии в отдельное направление и интегрировать его в дальнейшем в ФКП (конечно, согласованно с предлагаемой ФЦНТП).

5. Предотвращение и уменьшение ущерба

Решаемые задачи: Создание скоординированной системы разработки средств предотвращения столкновения угрожающего тела с Землей и уменьшения тяжести последствий от столкновения.

Комментарий: Как показали консультации с экспертами центра «Антистихия» МЧС выработка эффективных технологий уменьшения ущерба имеет огромное значение. К сожалению, задача отработки столь массовых мер особенно во взаимодействии с международным сообществом остается нерешенной.

На рис. 1 показана структурная схема ФЦНТП «Система астероидно-кометной безопасности России». На диаграмме указаны названия подпроектов (в левой части соответствующего блока), привлекаемые (уполномоченные) министерства, ведомства или другие госорганы (в правой части соответствующего блока). Показаны соответствующие взаимосвязи. Подчеркивается, что главным результатом работы в (под)проектах «Обнаружение и мониторинг опасных небесных тел» и «Характеристики опасных небесных тел и оценка рисков» (с использованием, в частности средств космического базирования) является надежная обоснованная оценка уровня угрозы. При уровне выше некоторого критерия (важнейший вопрос выработки такого критерия должен решаться совместно МЧС, МО, РАН, и другими вовлеченными ведомствами) государство должно принимать решение о принятии мер предотвращения или уменьшения ущерба. Отметим также, что государственный орган, ответственный за координацию на внутрироссийском уровне должен взаимодейство-

вать с МИД РФ, поскольку международная кооперация является важнейшей составляющей общей системы.



Рис. 1. Структурная схема ФЦНТП «Система астероидно-кометной безопасности России»

Перед началом работы над проектом ФЦНТП об этом были проинформированы практически все организации — потенциальные участники программы. Многие из них откликнулись положительно. Официальные письма о согласии их работать в рамках будущей ФЦНТП имеются в архиве ИНАСАН. Конечно, этот список не полон (но может в дальнейшем изменяться и пополняться). Приятно отметить, что практически все ведущие центры астрономических исследований в России принимают участие в работе.

Для осуществления этой программы совершенно необходима поддержка государства. Как видно из предыдущих разделов проблема АКО — многоплановая и требует для своего решения участия многих министерств и ведомств. В рамках учреждений РАН и образовательных учреждений проводятся отдельные фундаментальные исследования по направлению. Однако для организации полноценной службы обнаружения и каталогизации объектов, сближающихся с

Землей, с возможным привлечением средств космического базирования, у этих учреждений средств недостаточно. Тем более, в сфере ответственности исследовательских учреждений фундаментального профиля не могут входить отработка дорогостоящих технологий предотвращения и/или уменьшения ущерба. Вот почему реализация программы может быть осуществлена только на государственном уровне. Координация со стороны государства — необходимое условие в реалиях России.

Как мы видели выше, НАСА предписывается широкий спектр работ по проблеме АКО. Аналогично, в Европе в 2009 г. начат большой проект The European SSA (Space Situational Awareness) System — Европейская Система Космического Предупреждения, одной из трех задач которой является организация работ по проблеме АКО в общеевропейских масштабах. По-видимому, логично, чтобы функцию такого координатора в России выполнял Роскосмос при том, что работы по обнаружению, мониторингу, оценке рисков были бы поручены академическим и университетским исследовательским центрам.

Выводы

- Проблема астероидно-кометной опасности реальна, хотя усредненный уровень угрозы оценивается ниже, чем для ряда других природных, техногенных и социальных бедствий.
- Астрономия — ключевая наука для решения глобальной проблемы астероидно-кометной опасности.
- Проблема многоплановая, и ее решение требует четкой координации и поддержки со стороны государства.
- Предлагаемой формой подхода к решению проблемы является разработка и выполнение соответствующей Федеральной целевой научно-технической программы.

Список литературы

1. *Шустов Б. М.* Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра // Физика космоса: Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 206—225.
2. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В.* Астероидно-кометная опасность: новые подходы // Вестник РАН. — 2009. — вып. 7. — С. 579—586.
3. *Chesley S. R., Chodas P. W., Milani A. et al.* Quantifying the Risk Posed by Potential Earth Impacts // Icarus. — 2002. — Vol. 159. — P. 423—432.
4. *Денисенко С. А., Камус С. Ф., Пименов Ю. Д. и др.* Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. — 2009. — Т. 76, вып. 10. — С. 48—51.

М. А. Безбородов

Волгоградский государственный университет

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ ЗА ФРОНТОМ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ: ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Численные модели и аналитическая теория предсказывают наличие ударного скачка при протекании межзвездного газа через спиральный рукав дисковой галактики на передней по отношению к натекающему потоку стороне рукава. Наблюдения строения спиральных рукавов некоторых плоских галактик, положение радиуса кротации в которых известно, показывают что пыль иногда концентрируется не на передней, а на задней кромке рукава. Целью работы является анализ особенностей пространственного распределения пыли, переносимой потоком межзвездного газа сквозь спиральный рукав Галактики.

Физическая модель основывается на следующих положениях: газ и пыль рассматриваются как сплошные взаимопроникающие среды, их динамика описывается в гидродинамическом приближении, система «газ-пыль» рассматривается как гетерогенная смесь, не учитываются заряд пылинок и наличие электромагнитных полей, учитывается внешнее гравитационное поле, создаваемое звездами в спиральном рукаве. Пыль рассматривается как среда бесстолкновительная по отношению к взаимодействию пылинок между собой и столкновительная по отношению к газу. Показано, что диффузия пылевых частиц не существенна, учитываются только силы давления на пыль со стороны газа и стоково трение. Численный анализ показывает, что максимум в распределении концентрации пыли отстает по потоку от максимума концентрации газа вследствие большей инерции пылевых частиц. При определенных условиях пики плотности пыли и газа могут быть разнесены на расстояния порядка ширины рукава.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области (грант РФФИ-Поволжье 09–02–97019) и Рособразования (госконтракт П1248).

В. С. Беркутов¹, Я. В. Найден¹, О. В. Верходанов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

СИММЕТРИЯ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА

Предлагается тест на проверку гауссовости фонового сигнала в зонах, симметрично расположенных относительно экватора. Тест основан на исследовании доминирующих гармоник в симметричных зонах и проверки распределения корреляционных коэффициентов в зависимости от выделяемого мультиполя. В галактической и эклиптической системах координат выделены симметрично расположенные зоны и исследованы на наличие антисимметричного сигнала. В нескольких зонах в распределении корреляционных коэффициентов обнаружены негауссовы свойства.

РЕЗОНАНСНАЯ СТРУКТУРА ОБЛАСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Гравитационное поле Земли не является сферически-симметричным. При движении спутника вокруг Земли наблюдается явление резонанса, обусловленного влиянием тессеральных гармоник гравитационного поля Земли. Одним из параметров, оказывающих существенное влияние на характер орбитальной эволюции спутника за счет действия сил светового давления, является парусность (отношение миделева сечения спутника к его массе). При движении спутника в окрестности резонансных зон возмущения, вызываемые световым давлением, могут приводить к качественным изменениям орбитальной эволюции.

Целью работы является изучение резонансной структуры области движения ИСЗ на основе исследования долгопериодической эволюции элементов орбиты при различных значениях парусности. Разработан алгоритм и составлена программа для определения положения резонансных зон в зависимости от парусности объекта с учетом вековых возмущений, обусловленных сжатием Земли, притяжением Луны и Солнца, влиянием светового давления. Вычислены значения элементов орбиты, при которых возможно явление резонанса. Во второй части работы на основе результатов численного моделирования, выполненного с помощью «Численной модели движения ИСЗ» [1], исследована эволюция элементов орбиты спутника в резонансных областях. При уточнении ширины резонансных зон использовались критические аргументы, соответствующих резонансов, а также значения интегральной автокорреляционной функции.

Список литературы

1. *Бордовицына Т. В., Батурин А. П., Авдюшев В. А., Конева П. В.* Обновленный комплекс программ «Численная модель движения ИСЗ» // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики.* — Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004.

ХРОМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ БЛАЗАРОВ

Ахроматическую переменность блазаров обычно объясняют доплеровским усилением излучения при уменьшении угла между лучом зрения и направлением движения излучающего источника синхротронной природы, имеющего степенной спектр. В случае чисто степенного спектра переменность, действительно, будет ахроматической. Рассмотрение спектров блазаров в широком диапазоне частот показывает, однако, что спектры их степенные лишь на ограниченном интервале частот. Вблизи этого интервала спектры (в логарифмических координатах) становятся более пологими. А поскольку доплеровское усиление сопровождается изменением частоты, переменность может оказаться хроматической. При малых красных смещениях в наблюдаемую (оптическую) область может переместиться участок более пологого ИК спектра и будет наблюдаться эффект «чем ярче, тем голубее». При больших красных смещениях, когда в наблюдаемую область попадает более пологий спектр, сдвиг частоты может переместить в наблюдаемый интервал более крутой участок спектра и будет наблюдаться эффект «чем ярче, тем краснее». Таким образом, при неизменном изначальном спектре может наблюдаться хроматическая переменность. Изучению этого эффекта посвящен доклад.

**КРИВАЯ БЛЕСКА
ОПТИЧЕСКОГО ТРАНЗИЕНТА GRB060526**

Гамма-всплески (ГВ) — масштабные космические явления взрывного характера, наблюдаемые в самой жёсткой части электромагнитного спектра. Гамма-излучение является самым высокоэнергичным, энергии квантов гамма-излучения лежат в диапазоне 10^5 — 10^9 эВ. В настоящее время для наблюдения ГВ работает хорошо построенная схема. Орбитальные гамма телескопы обнаруживают ГВ, после чего координаты через 10—20 с попадают на Землю, где выкладываются в интернет для общего доступа. Оптические телескопы могут навестись и попробовать найти оптический транзиент данного ГВ. В данной работе построена кривая блеска оптического транзиента ГВ GRB060526 по наблюдениям на Российско-Турецком 1.5 м телескопе РТТ-150. Наблюдения выполнены в период с 25 мая по 2 июня 2006 г. с помощью широкополосных фильтров В, V, R. Кривая блеска показала в начале указанного интервала наблюдений (первые сутки) плавный спад яркости, затем—эпизоды увеличения яркости на фоне падения, и в конце интервала—перелом, после которого начался более быстрый спад. Определена степень зависимости падения потока от времени жизни оптического транзиента. Получены значения $\alpha = -1.25$ для первой ночи и $\alpha = -4$ для последней ночи наблюдений ($\alpha = \log F / (2.5 \log t)$, где F —поток, t —время с момента гамма-всплеска). Таким образом, в первую ночь затухание происходило более медленно, чем в последующие ночи. Это может быть связано с изменением в геометрии струи излучающего газа, например, с более сильным раскрытием угла раствора струи в последнюю ночь оптических наблюдений на РТТ-150.

ДИНАМИКА СТОЛКНОВЕНИЙ ОБЛАКОВ НІ В МЗС

Межзвездная среда распределена в межзвездном пространстве в основном в виде облаков различного размера и формы. Облака межзвездного газа не являются совершенно обособленными друг от друга скоплениями. Они периодически сталкиваются, разрушаются и образуются вновь.

В данной работе рассматривалось столкновение облаков межзвездного газа, с учетом объемного нагрева и охлаждения МЗС и теплопроводности.

Процесс столкновения облаков межзвездного газа описывается системой уравнений газовой динамики, которая включает в себя функцию объемного охлаждения — $\Lambda(n, T)$, отвечающую стандартному химическому составу, функцию объемного нагрева МЗС — Γ , и теплопроводность, с учетом насыщения теплового потока при высоких температурах.

Для построения 2D моделей столкновения облаков межзвездного газа использовалась численная нелинейная схема типа MUSCL, удовлетворяющая TVD свойству.

Были проведены численные расчеты по исследованию влияния параметров облаков (массы облаков, их радиуса, отношения характерного времени столкновения облаков к характерному времени радиативных потерь) на результат столкновения.

В результате моделирования было получено:

- облака при лобовом симметричном столкновении разрушаются, формирование нового облака маловероятно;
- после разрушения облаков сохраняется разделение среды на теплую и холодную фазы;
- теплопроводность эффективно подавляет гидродинамические неустойчивости, которые возникают на стадии коллапса облака.

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ЗВЕЗД

Используя данные о напряженностях магнитных полей нормальных звезд [1], радиусы звезд из каталога [2] и средние зависимости радиусов от спектрального класса звезд [3] найдены магнитные потоки более чем 600 звезд главной последовательности и звезд гигантов. Функция распределения магнитных потоков рассматриваемых звезд асимметрична и не описывается нормальным распределением. Отклонения от нормального закона могут быть объяснены тем, что значительная часть звезд с малыми магнитными потоками не может быть обнаружена так как напряженности их магнитных полей недостаточны для уверенной идентификации.

По данным о магнитных полях магнетаров, пульсаров и белых карликов [4, 5] была найдена функция распределения средних магнитных потоков. Обнаружено, что эта функция для пульсаров подобна аналогичной функции для нормальных звезд, однако, со средним магнитным потоком на пять порядков более низким. Это говорит о наличии эффективного механизма потери магнитного потока массивных звезд, действующего на стадии их эволюции после главной последовательности и в процессе их гравитационного коллапса. Но этот механизм не работает для магнетаров, так как они имеют средний магнитный поток сравнимый с потоком у нормальных звезд.

Список литературы

1. *Bychkov V. D., Bychkova L. V., Madej J.* // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Vol. 394. — P. 1338.
2. *Pasinetti Fracassini L. E., Pastori L., Covino S.* // Astron. Astrophys. — 2001. — Vol. 367.
3. *Allen C. W.* Allen's Astrophysical Quantities, Ed. by A. N. Cox. — New-York: Springer, 2000. — P. 719.
4. *Hobbs R. N., Teoh G. B., Hobbs A.* // Astron. J. — 2005. — Vol. 129.
5. McGill SGR/AXP Online Catalog. — <http://www.physics.mcgill.ca/pulsar/magnetar/main.html>.

АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР

В докладе рассматриваются аккреционные диски вокруг невращающихся черных дыр с учетом адвекции и с учетом перехода между оптически толстой и оптически тонкой областью. Для учета эффектов ОТО использовался потенциал Пачински—Витта. Показывается, что при больших мощностях аккреции решение локальной задачи перестает быть непрерывным. Рассматривался геометрически тонкий диск. Использовались формулы для радиационных потерь и радиационного давления при больших и малых эффективных оптических глубинах. Эффективная оптическая толщина определялась по общей формуле, верной при любых значениях оптических толщ. В работе представлен численный метод решения получающихся дифференциальных уравнений. Рассматривается подробная структура аккреционного диска при режиме сверхкритической аккреции. Приводятся графики радиальных зависимостей для различных величин аккреционного диска: температуры, радиальной скорости аккреции, угловой скорости и др. Для значения параметра вязкости 0.5 посчитана зависимость максимальной температуры диска от мощности аккреции. Показано существование максимума температуры при мощности аккреции $\dot{m} \approx 35$ (в безразмерных единицах).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ А, F МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНЫХ ПОТОКОВ

Определение фундаментальных параметров звезд имеет в астрофизике важное значение. Работа посвящена решению этого вопроса на основе, видимо, самого точного метода инфракрасных потоков (IRFM-метода). Суть этого метода определения эффективной температуры и диаметра звезды заключается в определении интегрального потока излучения от звезды и в совместном решении следующих уравнений:

$$\sigma T^4 = \frac{4}{\theta^2} \left(\int_0^\infty f_\lambda d\lambda + IBC(T, \log g) + UBC(T, \log g) \right), \quad (1)$$

$$\frac{4f_\lambda}{\theta^2} = F_\lambda(T, \log g). \quad (2)$$

Здесь F_λ — теоретический поток у поверхности звезды; f_λ — наблюдаемый поток; T — эффективная температура звезды; θ — угловой диаметр звезды; UBC и IBC — УФ и ИК поправки.

Работу можно разделить на две части. Первая часть была посвящена освоению метода IRFM на примере звезды-сверхгиганта α Lep и разработке программы, реализующей этот метод. Входными данными для программы являются интегральный поток от звезды, монохроматический инфракрасный поток и априори известное значение $\log g$ звезды. Было показано, что вычисленные с использованием разных оптических каталогов параметры звезды довольно сильно различаются ($T_{eff} = 6\,950\text{--}7\,350$ К, $\theta = (1.60\text{--}1.65) \times 10^{-3}$ "). Полученные данные, в сочетании с значением параллакса звезды из каталога HIPPARCOS, позволили сделать оценку светимости и радиуса звезды. Также была получена оценка массы и возраста звезды по теоретическим изохронам Бертелли и Брессана 1994 г.

Во второй части работы были определены параметры некоторых звезд типа δ Sct, которые представляют интерес для кафедры астрономии КГУ. Для этого была использована методика, разработанная в первой части данной работы.

Т. Г. Копытова¹, В. В. Крушинский¹,
Е. С. Горбовской², В. М. Липунов²,
А. А. Белинский², В. Г. Корнилов²,
Н. В. Тюрина², Д. А. Кувшинов²,
П. В. Балануца², А. Г. Тлатов³, С. А. Язев⁴,
В. В. Юрков⁵ и др.

¹Уральский государственный университет,

²Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга,

³Кисловодская солнечная станция ГАО РАН,

⁴Иркутский государственный университет,

⁵Благовещенский государственный педагогический
университет

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ GRB091020 И GRB091127 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ТЕЛЕСКОПА «МАСТЕР-II», КИСЛОВОДСК

В работе исследована поляризация излучения двух гамма-всплесков: GRB091020 и GRB091127. Наблюдения проводились в ортогональных поляризационных фильтрах на телескопе МАСТЕР-II в Кисловодске. Съемка GRB091020 началась через 3 420 с после регистрации вспышки, всего было получено по 65 изображений в каждом фильтре с экспозициями в 180 с. Съемка GRB091127 проводилась на промежутке от 92 до 630 с после регистрации вспышки, получено по 9 изображений в каждом фильтре с экспозициями от 20 до 180 с. Фотометрическая обработка изображений выполнена в программном пакете IRAF. Анализ данных показал, что различие в кривых блеска, полученных в ортогональных поляризационных фильтрах, для GRB091020 не превышает 3σ , а для GRB091127 — 0.25σ .

Работа проведена при поддержке Федерального агентства по науке и образованию в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013», государственный контракт № 02.740.11.0249. «Оптический мониторинг ближнего и дальнего космического пространства роботизированной сетью телескопов МАСТЕР».

© Т. Г. Копытова, В. В. Крушинский, Е. С. Горбовской, В. М. Липунов,
А. А. Белинский, В. Г. Корнилов, Н. В. Тюрина, Д. А. Кувшинов,
П. В. Балануца, А. Г. Тлатов, С. А. Язев, В. В. Юрков и др., 2010

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ОБЛАКОВ И В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Важной составляющей Галактики является межзвездная среда. Межзвездный газ составляет несколько процентов от видимого вещества но его роль очень велика. Большая часть межзвездного газа существует в виде облаков различной формы и размеров. Облака же не являются совершенно обособленными структурами, они взаимодействуют, разрушаются и вновь образуются.

Несмотря на важность процесса столкновения облаков до сих пор не существует детальных трехмерных исследований данного процесса. Скорее всего это связано с недостаточностью вычислительных ресурсов, доступных до недавнего времени.

Для компьютерного моделирования неупругих столкновений облаков была реализована пространственно нерасщепленная TVD схема типа MUSCL, обеспечивающая третий порядок аппроксимации по пространству в областях гладкого течения и первый на скачках. За счет применения алгоритмов пересчета типа Рунге—Кутты, реализованная численная схема обладает вторым порядком по времени.

С помощью разработанного кода были получены трехмерные модели столкновений облаков с различными начальными параметрами: лобовое столкновение идентичных облаков, столкновение облаков различного размера, нелобовое столкновение. Во всех моделях температура облаков составляет 80 К. Концентрация вещества в облаках — 10 атомов/см³. Температура межзвездной среды принималась равной 10⁴ К, плотность около 0.1 атомов/см³.

В результате исследования изучено влияние на динамику столкновения облаков процессов нагрева и охлаждения, теплопроводности, а также разрешения расчетной сетки. В работе сделаны следующие основные выводы: 1) в результате взаимодействия облака разрушаются, при всех просчитанных начальных конфигурациях; 2) масса холодного и плотного вещества облака в результате взаимодействия сохраняется или изменяется незначительно; 3) для адекватного моделирования процесса необходимо высокое разрешение (не менее 50 ячеек на радиус облака).

КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК И АДИАБАТИЧЕСКОЕ ПОДЖАТИЕ ТЕМНОГО ГАЛО

Существование скрытой массы во Вселенной широко известно, давно обсуждается и исследуется. Среди значительного количества наблюдательных подтверждений ее существования (а есть и теоретические!) — рентгеновские наблюдения горячих корон эллиптических галактик, приливные структуры взаимодействующих галактик, гравитационное линзирование, динамика галактик в скоплениях и группах, анализ кривых вращения спиральных галактик. Остановимся на последнем методе: кривая вращения галактики не совпадает с кеплеровской, а имеет более «плоский» и не меняющийся на большом удалении от центра вид, что и свидетельствует о наличии «лишней» массы в галактике. В данной работе изучается влияние адиабатического поджатия гало на поведение кривых вращения в пределах вириального радиуса. Рассматривается сценарий иерархического сжатия темных гало, рассчитывается погружение барионного звездного диска в гало и «отклик» гало на формирующийся внутри диск для разных значений параметров. Используется стандартная NFW-модель темного гало и космология Λ CDM.

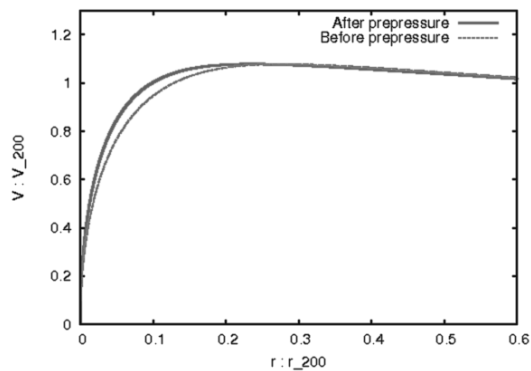


Рис. 1. Зависимость между кривыми вращения до и после поджатия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПЕКУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК

В настоящее время с помощью целевой и мультиспектральной спектроскопии на больших инструментах возможно получение данных о полях скоростей пекулярных галактик, в частности, галактик с полярными кольцами, однако проблема интерпретации получаемых данных остаётся во многом нерешенной. Восстановление распределения плотности по наблюдательным данным производится путем подбора деталей в распределении плотности с подходящими параметрами, с последующей проверкой стабильности такой детали с помощью численного моделирования динамической эволюции галактики.

При этом достаточно надежные критерии отождествления особенностей полей скоростей с деталями распределения плотности практически отсутствуют, вследствие чего конструирование модели галактики зачастую подразумевает простой перебор множества возможных вариантов.

Использование наиболее популярных сейчас иерархических алгоритмов решения задачи N тел для моделирования динамической эволюции моделей галактик при решении рассматриваемой задачи затруднено, поскольку данные о полях скоростей и распределениях плотности, получаемые из наблюдений, существенно неполны. Для сравнительно быстрой оценки стабильности деталей в распределении плотности и/или определения недостающих параметров итерационными методами требуются другие, менее ресурсоемкие алгоритмы, позволяющие, насколько это возможно, рассматривать эволюцию деталей в распределении плотности в отдельности от общей эволюции галактики. В качестве такого алгоритма предлагается использовать так называемый «метод самосогласованного поля», по многим параметрам оказывающийся наиболее подходящим для решения поставленной задачи. В рамках данной работы был написан код, моделирующий динамическую эволюцию образования с заданной картой плотностей и скоростей, использующий данный метод.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНАХ НII ПО ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ ИОНОВ КИСЛОРОДА

Классический метод оценки электронной температуры (T_e) в зонах НII основан на измерении отношения интенсивностей запрещенных линий ионов кислорода ОIII и ОII. Мы задались целью определить, насколько отличаются оценки T_e , полученные классическим методом, от реальных в зоне НII вокруг массивной звезды. В качестве объекта наблюдений рассматривалась динамическая модель сферически симметричной туманности из H, He, C, N, O, S и пыли. Для расчетов были использованы программные комплексы Zeus2D, Cloudy и Cloudy3D. В данной работе применен способ, позволяющий использовать Cloudy3D для расчета линейчатого излучения модели зоны НII, в которой протекают динамические процессы. Для этого распределение T_e , рассчитываемое в Cloudy по уравнению теплового баланса, заменялось на распределение T_e из расчётов динамической модели. Входными параметрами модели были также спектр звезды, ход плотности, содержания элементов, размер туманности и расстояние до нее. Для зоны НII, образованной звездой главной последовательности с $T_{eff} = 30\,000\text{ K}$, на различных стадиях эволюции были посчитаны поверхностные яркости в линиях ОIII (4 959, 5 007, 4 363 Å) и ОII (3 727 и 3 729 Å). По отношению интенсивностей этих линий была оценена зависимость T_e от расстояния до центра изображения зоны НII.

Получено что: 1) оценки значений T_e в зоне ионизации ОIII хорошо согласуются с значениями T_e в исходной модели; 2) оценки T_e за пределами зоны ОIII плохо соответствуют реальности; 3) значение электронной концентрации слабо влияет на оценки T_e , полученные классическим методом.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, государственный контракт N 02.740.11.0247 от 07.07.2009 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

ЗОНДИРОВАНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЛАЗМЫ СИГНАЛАМИ РАДИОПУЛЬСАРОВ

Проведена обработка данных наблюдения пульсара b1929+10, в ходе которого использовалась 21 из тридцати 45-метровых параболических антенн телескопа GMRT.

Сеанс наблюдения был проведен с частотным разрешением 62.5 кГц в диапазоне от 325 до 341 МГц. Его длительность составила 24 минуты при временном разрешении 512 мкс.

В процессе обработки получен динамический спектр пульсара и его характеристики.

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КАРЛИКОВОЙ НОВОЙ MN DRA
В ИЮЛЕ—СЕНТЯБРЕ 2009 г.**

Звезда MN Dra относится к карликовым новым звездам типа SU UMa. Карликовые новые характеризуются вспышками на $2-6^m$ с интервалом между вспышками в несколько десятков дней. Звезды типа SU UMa отличаются от более долгопериодических катаклизмических переменных еще и тем, что они демонстрируют два типа вспышек: 1) с амплитудой $2-6^m$ и длительностью около двух—трех недель, 2) менее яркие с длительностью около 3—5 дней. Первые называются сверхвспышками, а вторые нормальными вспышками. Во время сверхвспышек наблюдаются короткопериодические колебания блеска — сверхгорбы.

Наши наблюдения проводились в июле-сентябре 2009 г. в Крымской Астрофизической Обсерватории (КрАО). Всего было получено около 8000 ПЗС-снимков в течение 61 ночи на телескопе К-380 (диаметр зеркала 38 см) при помощи ПЗС-камеры SBIG ST-7. Снимки были получены в интегральном свете. После фотометрической обработки этих снимков в программах MaxIm DL и GORANSKIJ WinFits были построены кривые блеска звезды. Наши наблюдения покрывают целый сверхцикл и включают в себя 2 сверхвспышки и 3 нормальные вспышки. Характерное время появления сверхвспышек было определено в 65 дней. Характерное время появления нормальных вспышек около 15 дней. Среднее значение точности определения блеска было в пределах от 0.03 до 0.07^m .

Для поиска периодичностей нами был использован метод Стеллингверфа. Частотный анализ делался отдельно для каждой из сверхвспышек, а также для наблюдений в минимуме блеска звезды. Средний период сверхгорбов для обеих сверхвспышек был определен в 0.105 дня, с полной амплитудой в 0.3^m . Средний период сверхгорбов для наблюдений в минимуме блеска был определен в 0.096 дня, с полной амплитудой в 1.2^m . Скорее всего, периодичность обнаруженная в минимуме блеска соответствует отрицательным сверхгорбам, которые вызываются классической обратной прецессией аккреционного диска, плоскость которого наклонена к орбитальной плоскости.

Д. И. Соловьёв¹, О. В. Верходанов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

СТАТИСТИКА ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ОБЛАСТИ ХОЛОДНОГО ПЯТНА НА КАРТАХ СМВ WMAP

Исследована статистика внегалактических объектов в области Холодного Пятна (галактические координаты $l = 209$, $b = -57$) в картах анизотропии СМВ по данным WMAP. Построены диаграммы $\lg(N) - \lg(S)$ для четырех симметричных относительно галактического центра областей размером $4 \times 4^\circ$, а также — 8×8 и $16 \times 16^\circ$. Подсчеты источников проводились с использованием каталогов АРМ (оптический диапазон), 2MASX (ИК) и NVSS (радиодиапазон). Результаты подсчетов противоречат гипотезе топологического дефекта, объясняющей происхождение данного эффекта.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ
КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ
ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ**

Протозвездные облака — гравитационно связанные ядра молекулярных облаков, имеющие массы порядка звездных масс и порождающие в своих недрах одну или несколько звезд в результате коллапса (сильного сжатия под действием самогравитации), фрагментации (деления на части) и аккреции (падения вещества). Турбулентность — хаотичные течения газопылевой среды — приводит к образованию и разрушению уплотнений в облаке. В процессе коллапса облака самогравитация уплотнений усиливается, поэтому на каком-то этапе коллапса некоторые из уплотнений могут оказаться гравитационно связанными и начинают самостоятельное сжатие. В результате такой фрагментации образуется кратная звездная система. Массы звезд в кратной системе могут быть в разы меньше массы одиночной звезды.

В этой работе исследуется совместное влияние вращения, магнитного поля и турбулентности на массы фрагментов и расстояния между ними. Используется трехмерный численный код *Megalion*. Для изучения фрагментов написана программа, которая рассчитывает гравитационную, тепловую, кинетическую и магнитную энергии, а также координаты и скорости центров масс фрагментов. Показано, что на исследуемом этапе коллапса обычно формируются не более двух гравитационно связанных фрагментов. Обращается внимание на чувствительность характеристик фрагментов к начальным условиям задачи, в частности полю скорости.

НЕОДНОРОДНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЛАКТИК СОГЛАСНО ОБЗОРУ SDSS DR7

Дается обзор проблемы неоднородности крупномасштабного распределения галактик от первых обзоров положений галактик на небесной сфере до современных трехмерных карт пространственного распределения галактик. Согласно последнему релизу данных спектрального обзора SDSS существует около 10^6 галактик с измеренными красными смещениями в области неба порядка 10 000 кв. град. Применение методов корреляционного анализа в совокупности с подсчетами галактик в сетке координат на небесной сфере показывает, что считавшееся ранее значение масштаба неоднородности равное 5 Мпк сильно занижено. На основе диаграмм подсчетов галактик в больших бинах красных смещений $dz = 0.01$ (что соответствует шагу по расстоянию $dr = 30$ Мпк/н) показано, что неоднородности с контрастом плотности в несколько десятков процентов достигают размеров 100 Мпк/н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЦЕПЛЕННОСТИ ОРБИТ АСТЕРОИДОВ

На основе статьи [1] написана и оттестирована программа для вычисления коэффициента зацепления l для двух Кеплеровых орбит по заданным элементам $a_k, e_k, i_k, \Omega_k, \omega_k$ ($k = 1, 2$).

С ее помощью исследованы пары орбит некоторых астероидов, элементы которых взяты из каталога AMPLE (Adaptable Minor Planet Ephemerides), разработанного в ИПА РАН.

Также на основе алгоритма, указанного в статье [2], написана программа для вычисления расстояний в пространствах Кеплеровых орбит. Под орбитой в данном случае подразумевается класс всех параметризаций решений уравнения (1),

$$\ddot{\mathbf{r}} + \kappa^2 \frac{\mathbf{r}}{r^3} = 0, \quad (1)$$

не изменяющих направление времени на временной оси, т. е. множество точек орбиты в смысле кривой, параметризованной по времени и вложенной в пространство \mathbf{R}^3 .

С помощью данных программ найдены коэффициенты зацепления некоторых пар астероидов и определены расстояния между ними.

Список литературы

1. *Kholshevnikov K. V., Vasiliev N. N.* On the linking coefficient of two Keplerian elliptic orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 1999. — Vol. 75, № 1. — P. 67.
2. *Kholshevnikov K. V.* Metric Spaces of Keplerian Orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2008. — Vol. 100, № 3. — P. 169.

ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АККРЕЦИОННОМ ДИСКЕ СИСТЕМЫ Cyg X1

С помощью численного моделирования исследована структура магнитного поля в аккреционном диске в системе Cyg X1. Система Cyg X1 представляет собой двойную систему, состоящую из голубого сверхгиганта с массой порядка $30 M_{\odot}$ и компактного объекта (предположительно черная дыра) с массой около $16 M_{\odot}$. В модели считается, что затравочным полем является магнитное поле голубого сверхгиганта (звезда-донор), которое усиливается в аккреционном диске за счет дифференциального вращения. В модели предполагается, что магнитное поле донора представляет собой поле магнитного диполя, ось которого проходит через внутреннюю точку Лагранжа L_1 . При этом индукция магнитного поля в точке L_1 считалась равной 100 Гс. Учитывались процессы диффузии магнитного поля в аккреционном диске, связанные с магнитным пересоединением в турбулентных вихрях и плаучестью магнитных силовых трубок. Гравитационное поле черной дыры (звезда-аккретор) задавалась с помощью псевдоньютоновского потенциала, приближенно учитывающего эффекты общей теории относительности. Расчеты проводились в двумерном и трехмерном приближениях. Показано, что в результате процесса массообмена за время порядка десяти орбитальных периодов в системе формируется квазистационарный аккреционный диск. Магнитное поле в аккреционном диске является преимущественно тороидальным и может превышать исходное затравочное поле в 100 и более раз. Проведен анализ структуры магнитного поля в рамках простой полуаналитической модели.

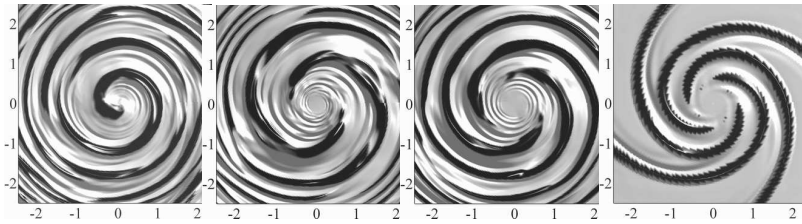
МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Целью работы является изучение динамического влияния остаточного крупномасштабного магнитного поля на структуру аккреционных дисков молодых звезд. Основные параметры аккреционного диска (температура, плотность, эффективная полутолщина, радиальная скорость, степень ионизации, магнитное поле) определяются из решения системы уравнений одномерной магнитной газодинамики в приближении стандартной модели Шакуры—Сюняева. Магнитное поле в диске определяется из уравнения индукции с учетом процессов омической диссипации и стационарной амбиполярной диффузии. Степень ионизации вещества диска вычисляется с учетом тепловой и ударной ионизации. В уравнении энергетического баланса учитывается вязкий нагрев, омический нагрев, нагрев амбиполярной диффузией, а также нагрев вещества диска за счет переизлучения света центральной звезды. В работе показано при каких значениях параметров модели (температура аккреции, параметр турбулентности) крупномасштабное магнитное поле существенно влияет на структуру аккреционного диска.

РАСЧЕТ ГЛОБАЛЬНЫХ СОБСТВЕННЫХ МОД В ГАЗОВОМ ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИСКЕ В ЛИНЕЙНОМ И НЕЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИЯХ

Для объяснения наблюдаемой спиральной структуры S-галактик в работе рассмотрена гравитационная неустойчивость на длинах волн, сравнимых с радиальным масштабом неоднородности равновесного газового диска.

В рамках линейного приближения реализована модель для определения собственных частот гравитационно неустойчивых возмущений в радиально неоднородном газовом диске. Важнейшим параметром, определяющим устойчивость вращающейся газовой системы, является параметр Тоомре $Q_T = \frac{c_s(r)\kappa(r)}{\pi G\sigma(r)}$, где $c_s(r)$ — скорость звука, $\kappa(r)$ — эписиكلическая частота, $\sigma(r)$ — поверхностная плотность.



С помощью нелинейного численного моделирования эволюции газового диска с учетом самогравитации были рассчитаны параметры (Q_T , джинсовский масштаб, кривая вращения, относительные массы галактических компонент), допускающие в численных моделях развитие спиральных структур различной морфологии (см. рисунок). Имеется хорошее согласие между результатами, полученными в рамках линейного и нелинейного подходов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-02-97021, 07-02-01204).

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ ВНУТРЕННИХ СПУТНИКОВ

В задачах орбитальной динамики близких спутников движение исследуемых объектов главным образом определяется мощным гравитационным влиянием центральной планеты. При достаточно низком требовании к точности модельной интерпретации спутниковых наблюдений формальное представление гравитационного потенциала планеты в большинстве случаев может быть ограничено только второй зональной гармоникой. В то же время решение задачи о движении спутника в поле тяготения сжатой планеты хорошо описывается теорией вековых возмущений первого порядка и для интерпретации наблюдений часто прибегают к простым кинематическим моделям на основе так называемых прецессирующих кеплеровых эллипсов [1, 2], где учитываются главные вековые эффекты в угловых элементах орбиты, вызванные сжатием планеты.

В данной работе представляются результаты кинематического моделирования орбит внутренних спутников Юпитера по имеющимся на данный момент астрометрическим наблюдениям. Указываются особенности в решении обратных задач спутниковой орбитальной динамики на основе кинематических моделей. В частности, показано, что при выборе в качестве определяемых параметров шести кеплеровых элементов вместе с тремя угловыми скоростями обратная задача становится плохообусловленной.

Список литературы

1. *Jacobson R. A.* The Orbits of the Inner Jovian Satellites // Bulletin of the American Astronomical Society / Ed. by M. F. Bietenholz, N. Bartel, M. P. Rupen, A. J. Beasley, D. A. Graham, V. I. Altunin, T. Venturi, G. Umana, & J. E. Conway: Bulletin of the American Astronomical Society. — Vol. 29. — 1997. — P. 1098.
2. *Arlot J., Emelyanov N. V.* The NSDB natural satellites astrometric database // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 503. — P. 631–638.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА В ГАЛО И СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

В работе изучена динамика газового диска во внешнем неосесимметричном гравитационном потенциале гало в приложении к проблеме генерации спиральных галактических узоров. В основе рассмотренной модели гало лежат данные наблюдений и космологические модели, указывающие на триаксиальную форму гало. Проведены многочисленные численные газодинамические расчеты по исследованию влияния параметров гало и диска на морфологию формирующихся спиральных волн.

Расчеты показали, что степень неосесимметрии в распределении вещества темного гало влияет не только на характерные времена рождения структур и амплитуду волн, но и на морфологию спиральной волны. В частности, при уменьшении параметра неосесимметрии уменьшается размер центральной структуры и угол закрутки рукавов. Наличие самогравитации газа улучшает условия для генерации спирального узора. Морфология узора зависит от параметров модели гало. Уменьшение характерного пространственного масштаба гало приводит к уменьшению размера центральной лидирующей спирали и угла закрутки отстающей спиральной волны (рис. 1).

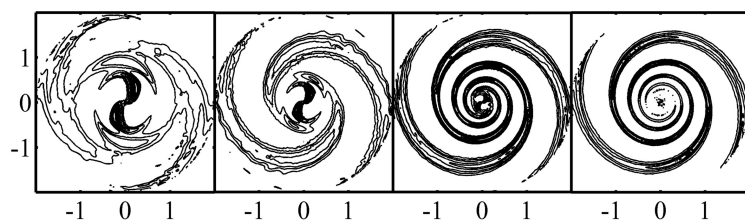


Рис. 1. Спиральная структура при различных значениях характерного масштаба неосесимметричного гало

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-02-01204).

© М. А. Бутенко, 2010

**РОЛЬ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОГО ГАЗА
В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ГАЛАКТИЧЕСКОГО СКОПЛЕНИЯ,
ПОГРУЖЕННОГО В ПОЛЕ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА**

Согласно данным оптических и рентгеновских наблюдений [1] барионный бюджет скоплений галактик поделен между звездной составляющей и межгалактическим газом (ICM-газа) в соотношении 1:4 и выше. Ввиду преобладающей массы межгалактического газа, необходимо учитывать его фактор в столкновительной эволюции скопления, включающего галактики и темный компонент (DM), описываемые в рамках задачи N-тел. Тестировалось несколько моделей ICM-газа, распределение плотности которого задавалось в предположении баростатического равновесия в приближении как конечной, так и бесконечно протяженной газовой атмосферы скопления. В модели «политропного газового шара», ICM-газ оказывается наименее сконцентрированным к центральным областям скопления и демонстрирует значение β -параметра ($\rho_{ICM} = \rho_{DM}^\beta$, близкое к оценкам модели [2] ($\beta = 0.45-0.6$), которые адекватно воспроизводят наблюдаемые рентгеновские профили поверхностной яркости галактических скоплений A383 и A2390. Комбинация рассмотренных моделей ICM-газа позволяет обозначить круг вопросов, связанных с проблемой взаимного влияния установившихся распределений темного вещества и межгалактического газа.

Список литературы

1. *Lagana T. F., Dupke R., Sodre L. et al.* The optical/ X-ray connection: intra-cluster medium iron content and galaxy optical luminosity in 20 galaxy cluster // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 394. — P. 357–366.
2. *Miyoshi S., Yoshimura M., Tanaka N.* New beta model of intracluster gas distribution // *Natural Science Series.* — 2008. — Vol. 37. — P. 45–58.

AMPLE 3 — МНОГОЦЕЛЕВОЙ ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В 1995 г. в ИПА РАН вышла первая версия пакета AMPLE (Adaptable Minor Planet Ephemerides). С его помощью можно планировать и обрабатывать наблюдения, изучать распределение параметров выбранных групп астероидов, визуализировать движение тел и так далее. Данные вычисляются на основе элементов орбит, публикуемых Центром малых планет. AMPLE распространяется как приложение к ежегоднику «Эфемериды малых планет».

В течении 15 лет поддержки и усовершенствования AMPLE появились еще два программных пакета, дополняющих AMPLE: MUSE (программа для работы с частью таблиц, обновляемых ежемесячно) и AMPLE for Comet (аналог AMPLE для комет).

Работать с тремя пакетами не очень удобно. Поэтому возникла идея новой версии, названной AMPLE 3, которая совмещала бы в себе все три пакета [1]. Пакет AMPLE 3 должен быть разработан самими современными программными средствами, быть совместимым с различными операционными системами, многоцелевым, понятным и доступным простым пользователям.

В настоящее время готовы только две ветви пакета: работа с таблицами элементов орбит малых тел (выборка, сортировка, гistogramмы, 2- и 3-мерные распределения и так далее) и визуализация орбит.

Список литературы

1. *Novikov F. A., et al.* AMPLE 3 — Multi-purpose software package for asteroids and comets // Asteroid-Comet Hazard — 2009 (ACH-2009): Book of abstr. of int. conf., IAA RAS, 21–25 sep. 2009. — Saint-Petersburg: 2009. — P. 52.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАДИАНТЫ НОВЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

С середины XIX в. известно, что кометы, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли, порождают метеорные потоки, наблюдаемые с Земли. Таким образом, возможно теоретическое прогнозирование новых потоков, связанных с недавно открытыми кометами.

В данной работе рассмотрены периодические кометы из каталога NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov/dat/ELEMENTS.COMET>), известные к июлю 2009 г. Из них выбраны сближающиеся с орбитой Земли до менее чем 0.1 а. е. После изучения литературы отброшены те кометы, потоки которых уже отождествлены. Для оставшихся 6 перебором точек орбиты вычислены точки сближения с орбитой Земли (для комет с низким наклоном — по 2). В этих точках вычислены радианты (направление вектора разности скоростей Земли и кометы) и геоцентрические скорости. Результаты приведены в табл. 1.

Рассмотрение каталогов известных потоков показало, что большинство вычисленных радиантов не активно, возможно, потому, что кометы перешли на современные орбиты недавно, и потоки проявятся по мере их растягивания. Радианты комет 46P и 197P близки к Феницидам и Июньским Боотидам, для которых известны другие родительские тела. Возможна тонкая структура этих потоков. Летний поток 222P близок к ω -Скорпидам и ϕ -Саггитаридам. Желательны ежегодные наблюдения вычисленных радиантов.

Таблица 1. Расстояния и скорости, даты, координаты радиантов (J2000.0)

Комета	Δ , а. е.	λ_{\odot} , °	Дата	α , °	δ , °	V_g , км/с
46P (Виртанена)	0,072	260,4	12 дек.	13,2	-50,7	9,9
197P (LINEAR)	0,053	67,3	28 мая	237,6	+60,1	16,5
222P (LINEAR)	0,062	231,0	13 нояб.	245,1	-32,6	17,2
222P (LINEAR)	0,089	110,5	12 июля	273,9	-30,6	17,2
P/1999 R1 (SOHO)	0,077	23,2	12 апр.	351,8	+4,1	41,2
P/2004 R1 (Макнота)	0,026	129,2	1 авг.	188,2	-23,8	10,2
P/2004 R1 (Макнота)	0,026	102,8	4 июля	205,7	-30,6	10,2
P/2006 T1 (Леви)	0,005	279,8	31 дек.	328,2	+56,8	13,8

ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ЗВЕЗД НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПСОИДОВ СКОРОСТЕЙ В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИСКЕ

По данным обновленной версии женевско-копенгагенского каталога исследовано влияние радиальной миграции звезд на зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей близких звезд в тонком диске Галактики, полагая при этом неизменными средние радиусы звездных орбит. Продemonстрировано, что именно радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тонком диске ответственна за наблюдаемую для близких звезд отрицательную корреляцию между их металличностью и угловым моментом, тогда как у звезд, рожденных на одинаковых галактоцентрических расстояниях, угловой момент не зависит ни от возраста, ни от металличности. По звездам, рожденным на солнечном галактоцентрическом расстоянии, показано, что компоненты скорости Солнца относительно местного стандарта покоя равны $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹. При этом обе координаты апекса солнечного движения все время остаются в пределах ошибок равными $\langle l_{\odot} \rangle = (70 \pm 7)^{\circ}$ и $\langle b_{\odot} \rangle = (41 \pm 2)^{\circ}$. Показатели степени зависимостей от возраста величин большой, средней и малой полуосей стали равными 0.26 ± 0.04 , 40.32 ± 0.03 и 0.07 ± 0.03 соответственно. В итоге оказалось, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей звезд тонкого диска, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии, увеличивается в размерах только в плоскости диска, тогда как в перпендикулярном ему направлении остается практически неизменным. Форма его все время остается далека от равновесной, а направление его большой полуоси не меняется с возрастом — эллипсоид все время сохраняет одинаковое и в пределах неопределенностей равное нулю отклонение вертекса ($\langle L \rangle = (0.7 \pm 0.6)^{\circ}$, $\langle B \rangle = (1.9 \pm 1.1)^{\circ}$). Столь малое увеличение с возрастом дисперсии скоростей в направлении перпендикулярном галактическому диску можно, по-видимому, объяснить «разогреванием» звездной системы лишь спиральными волнами плотности без привлечения гигантских молекулярных облаков.

ДОПЛЕРОВСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ SS CYGNI ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ

По спектральным наблюдениям системы SS Cyg, находящейся в активном состоянии построены доплеровские томограммы в линиях H_β и H_γ . Проведено сравнение полученных томограмм с аналогичными томограммами, построенных для спокойного состояния, а также с синтетическими томограммами, полученными по результатам трехмерного газодинамического моделирования. Оценены параметры аккреционного диска в момент вспышки. Предложено объяснение наблюдаемой картины течения по аналогии с численной моделью, включающей эллиптический аккреционный диск.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ И ДВИЖЕНИЙ В ОБЩЕЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

В докладе представлен краткий обзор результатов численных исследований классов состояний и типов. В начале кратко рассматривается история изучения этой задачи в небесной механике и звездной динамике. Далее проводится расширение известной классификации состояний, предложенной Себехеем: включается новый класс «тесное тройное сближение». Выводятся критерии состояний тройного сближения, простого взаимодействия и выброса в плоском и пространственном случаях. Исследована корреляция между параметрами различных состояний.

Рассмотрены два предельных случая общей задачи трех тел: плоская равнобедренная задача и прямолинейная задача. В обоих случаях изучено влияние параметров тройных сближений на длину последующих выбросов. Получена классификация типов движений в зависимости от числа тройных сближений и от времени для случаев равных и различных масс.

Обнаружен новый режим в эволюции тройных систем, состоящий в «прилипании» фазовой траектории к областям устойчивости вокруг основных периодических орбит. Движения в этих режимах можно исследовать методами символической динамики.

Найдены области устойчивости в пространстве параметров, определяющих начальные условия тройных систем. Эти области концентрируются вокруг основных периодических орбит (орбиты Шубарта, Брука, Мура и Дукати). Найдена новая периодическая S-орбита и исследована ее окрестность.

ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ АСЗ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА $1/2$ С ЗЕМЛЕЙ

Работа посвящена проблеме исследования динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), которая в свою очередь связана с актуальной проблемой астероидной опасности. Особый интерес в задаче исследования динамики АСЗ представляет наличие резонансных взаимодействий астероидов с Землей. В случае устойчивой резонансной геометрической конфигурации «астероид—Земля» резонанс может служить защитным механизмом от тесных сближений с планетой, а попадание АСЗ в неустойчивый резонанс повышает риск тесных сближений с ней.

В данной работе была исследована орбитальная эволюция АСЗ на интервале времени несколько тысяч лет, и выявлена группа астероидов, движущихся в окрестности резонанса $1/2$ с Землей. Всего было найдено 21 таких АСЗ. При исследовании орбитальной эволюции данных АСЗ были выявлены все тесные сближения с большими планетами в пределах 0.1 а. е. Для того, чтобы оценить, какие астероиды могут быть опасными для Земли, были исследованы области возможных движений этих АСЗ на интервале времени несколько тысяч лет. Области возможных движений строились как отображения во времени некоторых доверительных областей, полученных из анализа наблюдений рассматриваемых астероидов методом наименьших квадратов. Предварительно для исследуемых АСЗ были определены интервалы времени, на которых сохраняется приемлемая точность прогнозирования их движения. Исследования проводились с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений движения астероидов методом Эверхарта 19 порядка.

Анализ областей возможных движений показал, что из 21 АСЗ 5 астероидов находятся в устойчивом резонансе с Землей. Семь объектов движутся в окрестности этого резонанса, но геометрические конфигурации для них неустойчивы, что способствует тесным сближениям с Землей и увеличивает риск столкновений с ней. Для остальных 9 АСЗ выводы сделать нельзя до тех пор, пока не будут получены новые наблюдения.

**ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ
АНТИКОРРЕЛЯЦИИ [O/Na]
В ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЯХ**

В последнее время традиционный взгляд на происхождение шаровых скоплений (ШС) претерпел существенные изменения. Работы последних лет указывают на наличие в звездах некоторых ШС антикорреляции между такими химическими элементами, как C и N, Na и O, Mg и Al на фоне хорошо установленной однородности химического состава звезд по $[Fe/H]$.

В настоящей работе анализируется возможность конструирования эволюционной схемы, в рамках которой можно было бы воспроизвести основные наблюдаемые особенности химического состава ШС. Для численных расчетов была использована стандартная однозонная модель химической эволюции. В качестве источника аномалий химического состава в шаровых скоплениях рассматривался медленный ветер от массивных вращающихся звезд.

Анализ рассмотренных в работе сценариев эволюции ШС позволяет сделать следующий вывод: для того, чтобы воспроизвести наблюдаемые особенности химического состава ШС, необходимо предполагать, что рождение второго поколения звезд происходит в окрестности каждой отдельной массивной звезды; перемешивание сброшенного звездой вещества с межзвездным газом должно иметь локальный характер и быть в значительной степени неоднородным.

А. М. Соболев¹,

P. Boley²,

J. Bieging³,

J. Yang⁴, Y. Xu⁴,

А. П. Цивилев⁵, Г. Т. Смирнов⁵

¹Астрономическая обсерватория УрГУ,

²Max Planck Institute for Astronomy, Germany,

³Steward Observatory, USA,

⁴Purple Mountain Observatory, China,

⁵Пушчинская радиоастрономическая обсерватория

АКЦ ФИ РАН

ОБЛАСТЬ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S 235 C

Объект S 235 C расположен к югу от области звездообразования S 235 A и находится на существенно более ранней стадии звездообразования. В работе приведены свидетельства образования массивной звезды на границе зоны III, сообщается о молекулярном окружении объекта и обнаружении в нем мазера на переходе молекулы воды. Для исследования использовались собственные наблюдения на телескопе БТА, радиотелескопах SMT (США), Delingha 14m (КНР) и РТ-22 (ПРАО АКЦ ФИ РАН), а также данных инфракрасного спутника Spitzer и виртуальной обсерватории Skyview.

Работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (государственный контракт N П540 от 05.08.2009) в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и РФФИ (грант 08-02-00933).

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ
УРАВНЕНИЙ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ**

Термин регуляризация не имеет строго математического определения. Мы принимаем следующее. Система дифференциальных уравнений $\dot{x} = g(x)$ называется регуляризацией системы $\dot{x} = f(x)$, если для всех начальных условий решения $\dot{x} = g(x)$ определены при всех $x \in R$, а траектории $\dot{x} = g(x)$ геометрически совпадают с траекториями системы $\dot{x} = f(x)$ на ее интервале существования решений.

Внутреннее умножение корректно вводится для R^1 (вещественные числа), R^2 (комплексные числа), R^4 (кватернионы), R^8 (октавы). Из этого следует параллелизуемость сфер S^0, S^1, S^3, S^7 .

По теореме Фробениуса других алгебр с умножением и, следовательно, параллелизуемых сфер не существует.

Из параллелизуемости S^1 следует возможность регуляризации по Эйлеру—Леви—Чивита. Регуляризации на основе трехмерной матрицы не существует, так как S^2 не параллелизуема. КС регуляризации и ей подобные используют R^4 и S^3 .

В случае октавной регуляризации (на основе S^7) необходимо наложить не одну (как Кустаанхеймо), а 5 линейных связей, что ведет к проигрышу в быстродействии в пять раз. Однако, для сложных систем дифференциальных уравнений при использовании данного метода выигрыш может достигать четырех порядков.

Автор благодарит Программу поддержки ведущих научных школ Президента РФ (грант НШ-1323.2008.2) и грант РФФИ 09-02-00267-а.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ УБЫВАНИЯ ОБЩЕГО ЧЛЕНА РЯДА ЛАПЛАСА ДЛЯ ГЕОПОТЕНЦИАЛА

В книге [1] выведены точные оценки равномерной нормы общего члена ряда Лапласа по сферическим функциям для гравитационного потенциала планеты в зависимости от дифференциальных свойств распределения масс. На практике почти всегда используется среднеквадратичная норма. Представляет интерес перенос оценок с одной нормы на другую.

Эта задача теоретически решена в двух частных случаях [2, 3] для элементарных сферических гармоник. В данной работе устанавливается форма оценки среднеквадратичной нормы общего члена ряда Лапласа и оцениваются ее параметры численными методами. Для расчетов используются данные модели геопотенциала EGM2008.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-3290.2010.2), Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)» и Федерального агентства по образованию Минобрнауки РФ.

Список литературы

1. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. — М.: Наука, 1988. — 270 с.
2. Холшевников К. В., Шайдулин В. Ш. Асимптотика равномерной нормы присоединенных функций Лежандра P_n^k (случай $k \ll n$) // Вестник СПбГУ. — 2009. — Т. 1, № 2. — С. 86–93.
3. Холшевников К. В., Шайдулин В. Ш. Асимптотика равномерной нормы присоединенных функций Лежандра P_n^k (случай $n - k \ll n$) // Вестник СПбГУ. — 2009. — Т. 1, № 3. — С. 97–109.

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ЛИДОВА—КОДЗАИ НА ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ДВИЖЕНИЯ В ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМАХ

К настоящему времени обнаружено более 400 экзопланетных систем, из которых более 30 являются мультипланетными, т. е. системами с двумя и более планетами. В некоторых таких системах обнаружены резонансы средних движений. Как правило, считается, что планеты расположены примерно в одной плоскости. В настоящее время обнаружены планеты с массами, близкими к массе Земли. Все подобные планеты обнаружены именно в мультисистемах в результате обработки продолжительных рядов наблюдений. Встает вопрос об устойчивости таких планетных систем. Было показано [1] существование устойчивых орбит для планет малой массы в случае небольших эксцентриситетов больших планет, присутствующих в мультипланетной системе.

Также проведены оценки эволюции орбит в случае их некомпланарности с учетом эффекта Лидова—Кодзаи (резонанс Лидова—Кодзаи). Показано, что при больших углах между орбитами происходит увеличение эксцентриситета планеты малой массы, что приводит к неустойчивости орбиты.

Работа выполнена при поддержке Программы государственной поддержки ведущих научных школ НШ-1323.2008.2 «Кинематическая и динамическая астрономия» и НИР 8.14.05 «Исследование динамики звездных и планетных систем».

Список литературы

1. *Pitjev N. P., Sokolov L. L.* Boundaries and the chaotic stable motion in the restricted 3-body problem // ASP Conf. Ser. — 2004. — Vol. 316. — P. 76—79.

Стендовые доклады

Г. Г. Ахматханова¹, А. М. Соболев¹,
М. В. Юшкин², Р. Boley³, J. Biegging⁴

¹Уральский государственный университет, ²САО РАН,
³MPIA, Germany, ⁴Steward Observatory, USA

ТУМАННОСТЬ S233 И СОЗДАЮЩАЯ ЕЕ ЗВЕЗДА

По наблюдениям на телескопе БТА определены эффективная температура, ускорение силы тяжести, спектральный класс и радиальная скорость звезды, создающей туманность S233. Вклад в излучение окружающей ее оптической туманности вносят зона НII и отражение света звезды от границы газо-пылевого облака. Наблюдения на радиотелескопе SMT (США) показывают, что взаимодействие излучения звезды с газо-пылевым облаком приводит к образованию кинематически обособленных сгустков, в которых впоследствии может происходить звездообразование.

О ВЛИЯНИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА НА ГРАВИТАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

В работе рассмотрены некоторые условия развития гравитационной неустойчивости в дисковых галактиках, которая представляется одним из определяющих механизмов эволюции звездно-газовой системы в целом, прежде всего через звездообразование, и формирования разнообразных структур в газе и звездной подсистеме.

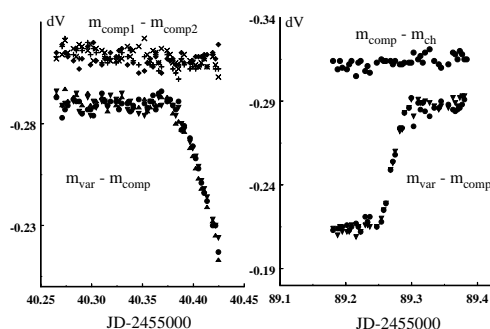
В рамках модели равновесного диска конечной толщины изучены собственные моды возмущений, определяющие возможность формирования гравитационной неустойчивости. Проведены расчеты дисперсионных зависимостей для высокочастотных (по сравнению с угловой скоростью вращения диска) мод с учетом самогравитации. Выявлены условия, при которых возможно развитие неустойчивости указанных мелкомасштабных по сравнению с толщиной диска мод. Получены оценки критических параметров для гравитационной устойчивости газового слоя при наличии внешнего давления, по порядку величины близкого к давлению газа в плоскости диска при отсутствии внешней среды.

Изучена нелинейная динамика гравитационно неустойчивых галактических дисков в зависимости от начальной толщины диска.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 07-02-00792, 09-02-97021 Поволжье.

НОВАЯ ПЕРЕМЕННАЯ?

Во время проведения мониторинга неправильной переменной V645 Cyg (май — ноябрь 2009 г.), находящейся в области звездообразования, у звезды 12 зв. вел. 3UC 281-203711, использовавшейся в качестве одной из звезд сравнения, была обнаружена переменность блеска с амплитудой порядка 0.08 зв. вел. в фильтре V . Из 17 ночей наблюдений изменение блеска звезды было зафиксировано в течение трех ночей. Наблюдения проводились на телескопе АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F_{\text{newton}} = 2.0$ м) Коуровской астрономической обсерватории УрГУ, с использованием ПЗС-камеры Alta-U6 фирмы Apogee, оснащенной сенсором фирмы Kodak KAF 1001E (1024x1024, 24 мкм). Средняя квадратичная ошибка одного измерения разности блеска в ночи наблюдений не превышала ± 0.006 зв. вел. Форма полученных фрагментов кривой блеска (см. рисунок) указывает на то, что звезда 3UC 281-203711, возможно, является затменной переменной.



Работа проведена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (государственный контракт № П540 от 05.08.2009) и Федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт N 02.740.11.0247 от 07.07.2009) в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда,
Г. Т. Кайзер, Э. Д. Кузнецов
Астрономическая обсерватория УрГУ

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ
ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ
НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2009 ГОДУ**

В 2009 г. на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрГУ проведено несколько сеансов позиционных наблюдений искусственных спутников Земли, движущихся по геосинхронным, высокоэллиптическим и средневысоким орбитам.

Определено 3200 положений для 126 геосинхронных объектов, 156 положений для 8 спутников на высокоэллиптических орбитах, 41 положение для спутника, движущегося по средневысокой орбите.

Астрометрическая обработка наблюдений выполнена с помощью программного комплекса FitsSBG, разработанного в АО УрГУ [1]. Среднеквадратические ошибки определения координат спутников не превышают $1''$.

Для геосинхронных спутников построено 153 улучшенных орбиты, для высокоэллиптических — 4 улучшенные орбиты, для спутника, движущегося по средневысокой орбите, определен один набор улучшенных элементов. Разности $O - C$ сферических координат спутников не превышают $3''$.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)»).

Список литературы

1. Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е. Программный комплекс для обработки ПЗС-наблюдений ИСЗ на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории // Окоземная астрономия — 2009. — М.: 2009. — В печати.

Г. Т. Кайзер¹, Ю. З. Вибе¹,
Д. В. Гламазда¹, П. В. Скрипниченко²
¹Астрономическая обсерватория УрГУ,
²Уральский государственный университет

ПОЗИЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ПЛАНЕТ В КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

В конце 2006 г. в Коуровской астрономической обсерватории Уральского государственного университета начались позиционные ПЗС-наблюдения малых тел Солнечной системы. Наблюдения проводятся на телескопе СБГ ($F = 798$ мм, $D = 420$ мм). В качестве приемника излучения используется ПЗС-камера Alta U32 фирмы Арогее, матрица 2184×1472 элемента, размер пиксела — 6.8 мкм. В программу наблюдений включены следующие объекты и явления: потенциально опасные астероиды, сближающиеся с Землей; видимые взаимные сближения астероидов; малые планеты, названные именами уральских астрономов, и другие астероиды из базы данных МРС.

К настоящему времени проведены наблюдения более 100 объектов, имеющих блеск от 12 до 18.3^m , в том числе 25 астероидов, сближающихся с Землей, 26 астероидов, имеющих видимые тесные сближения между собой, и более 60 других нумерованных и нenumерованных астероидов. Получено около 1500 точных положений. Среднеквадратические ошибки одного положения объектов до 17.5^m составляют $0.05\text{--}0.3''$, для более слабых они могут достигать $0.5''$. Для обработки наблюдений используется программное обеспечение, разработанное в ГАО РАН: программа Izmscd — для обработки снимков и ПС ЭПОС — для вычисления эфемерид и анализа точности наблюдений.

Результаты наблюдений передаются в Minor Planet Center и периодически публикуются в Minor Planet Circular. Полученные результаты будут использованы для изучения динамики малых тел Солнечной системы, в том числе объектов, потенциально опасных для Земли.

НАБЛЮДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОЛЯРА
XSS J00564+4548

В звезде, отождествленной с рентгеновским источником XSS J00564+4548, недавно были обнаружены колебания блеска с периодом около 480 с. Это свидетельствовало о том, что этот объект является промежуточным полярным. В октябре — декабре 2008 г. в течение 16 ночей мы провели фотометрические наблюдения этой звезды на 70-см телескопе и многоканальном фотометре. Продолжительность наблюдений составила 130 ч. Фурье-анализ показал, что в кривых блеска присутствуют одновременно два колебания с близкими периодами. Период одного из колебаний может представлять собой период вращения белого карлика. Второе колебание может возникать при переработке рентгеновского излучения белого карлика структурами двойной системы, вращающимися с орбитальным периодом. На рис. 1 показаны одна из полученных нами кривых блеска и ее амплитудный спектр, в котором видны два пика, соответствующие этим колебаниям. Анализ всех данных позволяет определить периоды колебаний с высокой точностью. Эти периоды равны 465.485 ± 0.008 и 488.618 ± 0.009 с. По этим двум колебаниям можно оценить орбитальный период двойной системы. Он равен 2.7311 ± 0.0014 ч.

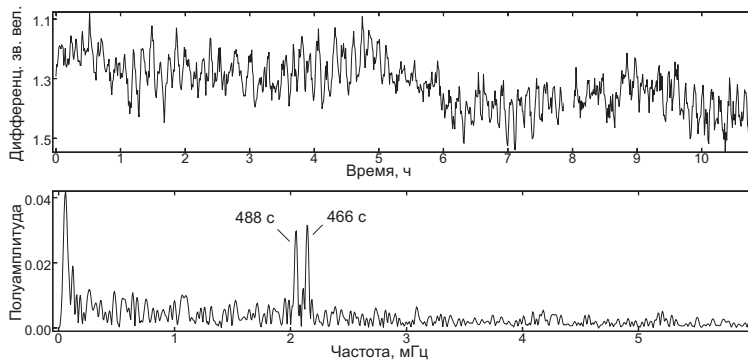


Рис. 1. Кривая блеска и амплитудный спектр объекта XSS J00564+4548

А. В. Кожевникова¹, В. П. Кожевников¹,
А. А. Дорогов², И. А. Юшков²

¹Астрономическая обсерватория УрГУ,

²Уральский государственный университет

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ CG CYG: ТРИ НОВЫХ СЕЗОНА НАБЛЮДЕНИЙ

Представлены результаты новых многоцветных фотометрических наблюдений затменной запятненной хромосферно-активной системы CG Cyg (G9+K3, период 0.63 сут.), относящейся к типу RS CVn, проведенных с целью мониторинга уровня активности этой системы. Дифференциальная фотометрия выполнена на 70-см телескопе и многоканальном фотометре АО УрГУ в 2005, 2008 и 2009 гг. в фотометрических полосах В, V, R и I. На кривых блеска CG Cyg во все три сезона обнаружена вращательная модуляция блеска, обусловленная темными холодными пятнами. Амплитуда вращательной модуляции в течение четырех лет изменялась в пределах от 0.15^m в 2005 г. до 0.05^m в 2008 гг. Наиболее запятненные области расположены вблизи выделенных активных долгот, разнесенных примерно на половину периода. В 2005 г. долгота максимума запятненности приходится на орбитальную фазу 0.97, а в 2008 г. на 0.41. В 2005 и 2009 гг. пятенная конфигурация не менялась в течение всего периода наблюдений — около полутора месяца. В 2008 г. одновременно с переключением долгот произошло резкое уменьшение амплитуды вращательной модуляции, что свидетельствует о существенном изменении пятенной конфигурации в течение месяца.

Проведено определение характеристик запятненных областей в рамках зональной модели запятненности. Получено, что пятна расположены внутри симметричной относительно экватора области шириной от 10 до 14° по обе его стороны, т. е. пятна локализованы в низкоширотной области. Параметр скважности заполнения пояса пятнами f_{min} изменялся от 0.22 до 0.59. Пятна оказались холоднее окружающей фотосферы на 2000 К. Площадь пятен от сезона к сезону менялась незначительно и составляла 13—14 % полной поверхности звезды, что близко к исторически максимальному значению запятненности системы CG Cyg.

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

На телескопе АЦУ-5 АО УрГУ в течение нескольких лет ведутся наблюдения с целью исследования вращения солнечных пятен. Пятна снимаются на видеокамеру в течение нескольких часов с интервалом в одну минуту. В зависимости от качества изображения съемка длится 5—10 с. Затем из полученных кадров выбираются наилучшие для дальнейшего изучения.

Отмечено, что характер вращения пятен весьма разнообразен, в частности, скорости вращения различных пятен заметно отличаются. Для детального исследования этого явления из наблюдательного материала за 2001—2005 гг. было отобрано 29 пятен, по которым была определена угловая средняя скорость вращения. Отбирались пятна преимущественно одиночные и имеющие не очень сложную структуру. Размеры пятен разнообразны: их диаметры составляют от 20 до 80". Рассматривалась возможная зависимость скорости — диаметр пятна. Наблюдается тенденция уменьшения скорости вращения с увеличением диаметра. Если небольшие пятна диаметром около 20" поворачиваются за час, в среднем, на три угловых градуса, то величина поворота больших пятен, диаметром 60—80", составляет около 0.7—0.9° в час.

Т. П. Никифорова¹, А. И. Шагабутдинов¹,
А. А. Калинин¹, Т. Г. Копытова²,
С. Ю. Парфёнов², М. С. Искалина²
¹Астрономическая обсерватория УрГУ,
²Уральский государственный университет

НАБЛЮДЕНИЯ ПРОТУБЕРАНЦЕВ В АО УРГУ ЛЕТОМ 2009 Г.

С целью выявления особенностей кинематических характеристик солнечных активных протуберанцев (АП), наблюдающихся в текущем минимуме солнечной активности, проведены наблюдения спектров протуберанцев на лимбе Солнца в избранные даты 2009 г. (16, 18 июня, 1, 2, 3, 4 июля, 12, 13, 14, 21, 27, 28 августа и 1 сентября). Наблюдения проведены в линиях водорода ($H\alpha$) и ионизованного кальция ($K\ CaII$) на солнечном телескопе АЦУ-5 и спектрографе АСП-20 с использованием ПЗС-системы SXV-H9 Starlight Xpress (1040×1396 пикселей). Форма протуберанцев и их расположение на диске Солнца определялись по сайту КА SOHO по наблюдениям в линии ионизованного гелия $304\ \text{\AA}$.

В вышеперечисленные даты только в двух протуберанцах обнаружены явления активности — выбросы малой мощности и малой длительности (меньше двух часов). Прослежено их развитие по ПЗС-изображениям линий. В протуберанце 01.07.2009 на NE лимбе обнаружены выбросы типа «спрей», со скоростями по лучу зрения, не превышающими 49 ± 0.7 км/с (такие скорости соответствуют малой мощности), с преобладающим направлением выбросов вдоль направления вращения Солнца. В протуберанце 27.08.09 на SE лимбе из анализа доплеровских смещений линий обнаружены характерные признаки петельной структуры и спиральных движений плазмы вдоль петли (рожки эмиссии, дугообразная форма спектральных линий, наклон спектральных линий к дисперсии). Оценены размеры поярчаний вдоль петли (23 000—37 000 км). Вывод. Наблюдались АП на высоких широтах ($40\text{--}60^\circ$), что характерно для начала нового цикла. Однако, отсутствие связи наблюдавшихся АП с активными областями, а также кратковременность выбросов и их небольшие скорости, согласуются с общим пониженным уровнем текущего минимума активности Солнца (23—24 цикл).

О ДИАГНОСТИКЕ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ ОКРУЖЕНИЯ МЕТАНОЛЬНЫХ МАЗЕРОВ

Возможность отслеживать процессы трансформации пыли в зонах звездообразования по анализу содержаний молекул определяется тем, что ряд относительно обильных молекул формируется на поверхности пыли и выделяется в газовую фазу в процессе испарения и разрушения пылевых частиц. К таким молекулам относятся метанол, SiO и др. При прохождении ударной волны содержание химически нестационарных молекул в газовой фазе увеличивается на порядки величины.

Возникновение мазерных источников на переходах некоторых молекул (таких как метанол) позволяет использовать их для определения физических параметров в областях формирования мазерных источников, чему способствует также и высокая чувствительность мазеров к условиям в среде. В прошедшем году был проведен анализ моделей мазеров метанола, рассчитанных в рамках радиативно-радиативной накачки. Анализ показал чувствительность мазеров метанола к спектру излучения пылевых частиц, определяемому как химическим составом, так и распределением частиц по размерам. Модели показывают, что соответствуют наблюдениям в основном модели с пылью, состоящей из частиц малых размеров (порядка 0.001—0.01 мкм). Особенностью молекулы метанола является одновременное возбуждение нескольких мазерных переходов в одной зоне формирования мазерного источника. Сравнение наблюдаемых и модельных отношений потоков разных мазерных линий обладает потенциалом с определенностью оценивать физические условия в среде (температуру газа и пыли, содержание молекул и водорода, оптические параметры пылевой компоненты среды). Высокая чувствительность мазеров метанола к параметрам накачивающего инфракрасного излучения позволяет отслеживать изменения таких физических параметров накачивающей пыли, как температура, с точностью до одного процента при использовании мультиспектрального анализа.

Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-02-97019).

ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА МАССИВНЫХ ДОЗВЕЗДНЫХ ЯДЕР

Измерение температуры и плотности в дозвездных ядрах, как правило, основано на наблюдениях теплового *излучения* пыли в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. При этом возникает проблема неоднозначности решения: один и тот же спектр может хорошо описываться разными распределениями плотности и температуры. В недавнее время благодаря обзорным наблюдениям на Космическом телескопе им. Спитцера для многих объектов появились данные о *поглощении* пылью фонового излучения в ближнем ИК-диапазоне (на длинах волн от 3 до 24 мкм), а также о поглощении и эмиссии на длине волны 70 мкм. Нами разработан метод, позволяющий при помощи детального моделирования переноса излучения в пылевой среде находить распределение плотности и температуры, которое одновременно удовлетворяет наблюдениям как в излучении, так и в поглощении. Оптимальное сочетание ключевых параметров распределения вещества находится при помощи генетического алгоритма. Метод применен к темным инфракрасным облакам IRDC 320.232+0.324 и IRDC 321.706+0.066. Показано, что результаты наблюдений во всех диапазонах лучше описываются моделью с внутренним источником излучения. Таким образом, классификация этих объектов как беззвездных массивных ядер, выполненная только по данным миллиметровых наблюдений, может оказаться неверной.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-4713.2009.2.

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ МАССИВНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С ГОРЯЧИМИ КОМПОНЕНТАМИ UU CAS

Исследованы кривые остаточных уклонений массивной двойной системы с горячими компонентами UU Cas для разных фотометрических полос. Как ранее было выявлено [1], у системы имеются значимые уклонения реальных кривых блеска в соответствующих цветах от модельных (система рассматривалась состоящей из двух звезд эллипсоидов), значительно превышающие 2σ , которые показывают взаимную коррелированность с высоким уровнем значимости. Эти уклонения присутствуют на кривых блеска UU Cas в двух разных сезонах, в значительной степени повторяя друг друга, что обеспечивает высокие коэффициенты взаимной корреляции кривых уклонений разных сезонов с высоким уровнем значимости. Этот результат указывает на неслучайный характер уклонений, а значит на наличие дополнительной причины переменности блеска этой системы звезд. Для более подробного исследования использованы наблюдения сезона 1975–1984 гг. одного из соавторов с большим объемом наблюдений. Выделены наиболее характерные участки, повторяющиеся в сезонах разделенных более, чем на 200 периодов. Создан каталог фотометрических характеристик отдельных деталей дополнительной переменности двойной системы (фазовый интервал, амплитуда, показатель цвета). Выявлена вспышка, произошедшая в системе в январе 1982 г., имеющая максимальную амплитуду (более 0.3^m) в фотометрической полосе U. Получена оценка энергии, выделенной за время вспышки.

Список литературы

1. *Полушина Т. С.* Анализ изменений блеска массивной ТДС UU Кассиопеи I // Астрон. журн. — 2002. — Т. 79, № 11. — С. 1–9.

СОЗДАНИЕ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ОБОСНОВАНИЯ ДЛЯ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ МАСШТАБОВ 1:500—1:5 000

Специалистами ЗАО «Дубль-Гео» и студентами УрГУ выполнялись работы по созданию планово-высотного обоснования в Октябрьском и Ленинском районах г. Екатеринбурга для использования при топографических съемках масштабов 1:500—1:5 000.

Создание съемочного обоснования проходило в три этапа:

- закладка пунктов;
- определение координат и высот пунктов посредством спутникового оборудования (GPS-приемник двухчастотный Javad Maxor GGDТ), электронного тахеометра Nikon NPL-332 и оптического нивелира CST/berger SAL32 ND;
- обработка полевых измерений в специальных программных комплексах (Topcon PinnacleTM, Trimble Geomatics Office, GPSurvey, CREDO_DAT) с последующим анализом точности планово-высотного обоснования.

Точность полученного планово-высотного обоснования удовлетворяет требованиям Инструкции по топографической съемке масштабов 1:500—1:5 000. СКО положения пунктов в плане и по высоте находится в пределах допусков, которые для съемки масштаба 1:500 и при высоте сечения рельефа 0.5 м составляют 140 мм в плане и 175 мм по высоте.

Анализ результатов измерений показал, что точность определения плановых координат с использованием GPS получилась выше, чем с использованием классических методов (СКО 3—17 мм и 30—50 мм соответственно), а точность определения высот, наоборот, получилась выше с использованием классических методов (СКО 0—7 мм в нивелирных ходах и 30—50 мм в GPS-измерениях). Исходя из этого, было принято решение за окончательные плановые координаты принять координаты, полученные с использованием GPS-измерений, а за окончательные высоты — высоты, полученные по результатам геометрического нивелирования.

БАРИЕВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Обработаны спектры, полученные 19.08.2008: Allen, Porto de Mello, Barbuy и Pereira на телескопе 2.2 м со спектрографом FEROS (ESO, Чили).

Эти оригинальные спектры таким образом раньше не обрабатывались. Также проанализированы спектры пяти бариевых звезд CD65-2893, HD22229, HD66812, HD56523 и HD31341 и отобраны неблендированные линии нейтрального железа (FeI), измерены их эквивалентные ширины.

Это дало возможность найти лучевые скорости. Измерены также эквивалентные ширины ряда других элементов, для того чтобы ознакомиться с повышенным содержанием элементов s-процесса.

Были определены фундаментальные параметры звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести на поверхности звезды и микротурбулентная скорость.

Также был определен химический состав исследуемых звезд. В результате оказалось, что возможно эти звезды являются необычными бариевыми звездами.

Исследования содержания химических элементов в атмосфере BaII (CP) являются актуальной задачей для понимания их природы и звездной эволюции, поскольку аномалии химического состава отражают синтез элементов в недрах звезды и процесс их выноса в ее атмосферу в различные фазы эволюции.

РАСШИРЕННАЯ БАЗА ЗНАЧЕНИЙ НАСЕЛЕННОСТЕЙ УРОВНЕЙ МЕТАНОЛА

Для ускорения процедуры оценки физических параметров областей образования массивных звезд сформирована база значений населенностей уровней энергии метанола (CH_3OH). В базе содержатся населенности, вычисленные в узлах четырехмерной сетки физических параметров. Диапазон параметров сетки характерен для областей образования массивных звезд (кинетическая температура: 10–220 К, плотность водорода: 3.6×10^3 – 10^9 см^{-3} , удельная лучевая концентрация метанола: 10^8 – $10^{13} \text{ см}^{-3} \text{ с}$, относительное содержание метанола: 10^{-9} – 10^{-6}). Расчет населенностей уровней энергии метанола осуществлен в приближении большого градиента скорости; использована модель молекулы CH_3OH в схемы которой включены уровни A – и E –метанола с энергиями верхнего уровня $\leq 1015.5 \text{ см}^{-1}$ и $\leq 1020.2 \text{ см}^{-1}$. В базу входят три блока, вычисленные в предположении, что ширины линий (ΔV) составляют 5 км/с (см. [1]), 1 и 10 км/с. Процедура получения оценок физических параметров в одном направлении с использованием одного блока базы населенностей занимает примерно двадцать минут процессорного времени (на Intel(R) Pentium(R) 4 с тактовой частотой 2 400 МГц). Выигрыш по времени относительно прямого вычисления населенностей составляет, как минимум, 10 раз. Добавленные в базу блоки с $\Delta V = 1$ и 10 км/с позволяют расширить диапазон анализируемых объектов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию, государственный контракт №П540 от 05.08.2009 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Список литературы

1. Салий С. В. База данных для оценки физических параметров молекулярных облаков по интенсивностям радиолиний метанола // Звездообразование в Галактике и за ее пределами / Ред. Д. З. Виббе, М. С. Кирсанова. — 2006. — С. 146–151.

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ S255 N, IR И S ПО ЛИНИЯМ МЕТАНОЛА

Газо-пылевые сгустки S255 N, IR и S расположены между развитыми зонами HII S255 и S257. По наблюдениям в сериях линий метанола с частотами 241 ГГц (10-м телескоп SMT, США) и 96 ГГц (20-м телескоп OSO 20m, Швеция) выявлены градиенты лучевых скоростей и ширин линий метанола (от 6.8 и 1.5 км/с в S255 S, до 8.6 и 3.0 км/с в S255 N). Оценки кинетических температур сгустков S255 N, IR и S, проведенные по наблюдаемым параметрам линий метанола, составляют 33, 55, 96 K, соответственно. Оценки плотностей составляют 10^5 , 3×10^5 и 10^4 см⁻³, соответственно. Отличия параметров свидетельствуют о различии в эволюционном статусе сгустков. Повышенная температура сгустка S255 S объясняется тем, что он находится в области распространения ударной волны.

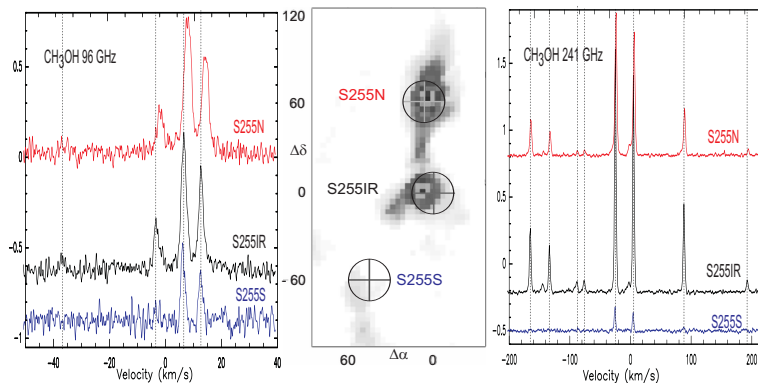


Рис. 1. Излучение S255 N, IR и S в линиях метанола и 1.2 мм континууме (Пирогов, Зинченко, 2007)

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, государственный контракт №02.740.11.0247 от 07.07.2009 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. и РФФИ (гранты 09-02-97019, 08-02-00933).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАССЕЯННОГО СКОПЛЕНИЯ М35

Представленная работа — часть исследования рассеянного звездного скопления М35 на основе данных фотометрии в полосах U, B, V, R, I, выполненной на 0.9-м телескопе обсерватории Китт-Пик. При наблюдениях использовалась камера, состоящая из 8 ПЗС-матриц 2048×4096 пиксел с размером пиксела 0.40 угловой секунды.

На полученной диаграмме цвет-величина была выделена полоса, содержащая вероятные члены скопления. Отобранные звезды использовались для построения карт распределения поверхностной плотности числа звезд. Значения поверхностной плотности вычислялись в узлах прямоугольной решетки с размером ячейки 30×30 пиксел. Для вычисления плотности использовался алгоритм функции-ядра; применялись значения полуширины ядра 500 и 1000 пиксел.

Основной полученный результат — это изменение положения центра скопления в зависимости от звездной величины (смещение до 6—7 угловых минут). Кроме этого, в распределении звездной плотности можно выделить структуру типа оболочки.

Для того, чтобы подтвердить реальность выявленных структурных особенностей, а также для построения профиля поверхностной плотности скопления были использованы данные Каталога Точечных Источников 2MASS. Использовалась выборка типа «box» с размером 7200×7200 секунд дуги. Для выделения звезд — вероятных членов скопления использовались диаграмма величина—показатель цвета $J-(J-H)$ и диаграмма $Q-(J-H)$. Полученные тем же методом карты поверхностной плотности подтверждают выводы, сделанные на основе оптических данных. Построенный профиль поверхностной плотности позволяет получить нижнюю оценку радиуса скопления в 40 угловых минут.

НОВЫЕ ОЦЕНКИ РАДИУСА, МАССОВОЙ ПЛОТНОСТИ И МАССЫ ЯДЕР НЕКОТОРЫХ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

Целью настоящей работы является расчет масс кометных ядер с привлечением новых результатов для радиуса и массовой плотности ядер комет.

Таким образом, в данной работе получены следующие основные результаты.

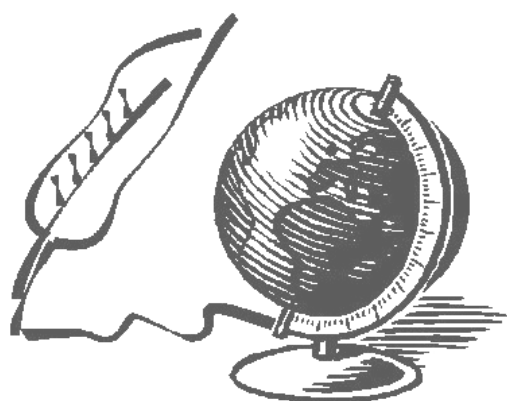
1. Сформулированы основные положения модели взаимодействия солнечного излучения со сферическим кометным ядром, определяющие ее теоретическое ядро и подходы к вычислению физических характеристик (радиуса, массовой плотности и массы).

2. Представлен алгоритм определения радиусов ядер комет. Получено аналитическое выражение для эффективного радиуса ядра кометы. Выполнен численный анализ результатов на примере 17 короткопериодических комет.

3. Получены новые, более «жесткие», ограничения на область допустимых значений массовой плотности ядра для 17 короткопериодических комет с использованием нового алгоритма, основанного на предположении о 4-компонентной структуре ядра. Важно отметить, что новые интервалы допустимых значений средней массовой плотности ядра значительно меньше интервалов, полученных предшественниками, что, несомненно, является новым шагом в решении указанной проблемы. Полученные ограничения на массовую плотность ядер некоторых комет (например, 81P/Wild 2, 9P/Tempel 1) успешно согласуются с данными экспериментов космических миссий, что указывает на справедливость предложенного алгоритма.

4. Получены численные значения эффективных масс 17 кометных ядер с использованием результатов для радиуса и массовой плотности в приближении модели сферического однородного ядра. Данные результаты хорошо согласуются с верхним пределом масс кометных ядер.

Из истории науки



СОЗДАТЕЛИ И ТВОРЦЫ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Решающую роль в создании Пулковской астрономической обсерватории, которая в 2009 г. отметила 170-летие, сыграл император Николай I (1796—1855). В советское время деятельность императора в области науки и просвещения рассматривалась необъективно. Однако имеются многочисленные публикации как дореволюционных, так и современных исследователей, в которых деятельность Николая I оценивается положительно [1]. В период его правления были созданы Педагогический и Технологический институты, Николаевская Морская Академия, Румянцевский и Зоологический музеи, университет Святого Владимира в Киеве, в Москве — Межевой институт, ставший центром подготовки геодезистов и картографов. Был издан новый устав для университетов, поставивший эти учреждения на уровень западно-европейских, создана стройная система гимназий и училищ, охвативших своей сетью все губернские и уездные города [2]. Были построены обсерватории в Казани и Киеве, в четыре раза увеличен бюджет обсерватории в Дерпте.

Император Николай Павлович правил тридцать лет. Данная эпоха в истории России так навсегда и осталась под названием «Николаевской». Исторические заслуги перед Россией Императора Николая I велики и разнообразны; они запечатлелись как в больших, так и малых делах. Его волей и трудами было упорядочено государственное законодательство, введено техническое и военное образование, проложены первые железные дороги, в том числе и самая протяженная для своего времени в Европе — Николаевская, связавшая Петербург и Москву. Появились законы о пенсиях, об охране окружающей среды, был принят самый совершенный для того времени акционерный устав, создана крупнейшая и самая современная в мире обсерватория (Пулковская). Много и других новшеств утвердилось в жизни Империи. Все они в той или иной степени явились делом того, кто получил свои огромные властные прерогативы для творения благополучия Отечества [1].

Николай I получил прекрасное образование. Ученик великого математика Эйлера — академик Логгин Юрьевич Крафт и профессор

Н. И. Вольгемут ознакомили его с высшей математикой, опытной и теоретической физикой, механикой. Из него вышел образованный человек, знающий инженер. Особенное влечение у него было к инженерному и архитектурному искусству. Любовь Николая Павловича к строительному делу не покидала его до конца жизни [3].

В 1827 г. на повестку дня встал вопрос о переносе городской астрономической обсерватории за пределы Санкт-Петербурга. Распоряжением императора в 1833 г. были выделена территория на вершине Пулковской возвышенности в 14 верстах от Московской заставы в Санкт-Петербурге и финансирование в размере 600 150 рублей серебром на строительство и приобретение современных астрономических приборов [4].

Торжественный акт закладки обсерватории состоялся 21 июня 1835 г., а тремя годами позже, 19 июня 1838 г. Николай I утвердил штаты и устав новой обсерватории. Торжественное открытие Пулковской обсерватории состоялось 7 августа (по старому стилю) 1839 г. Благодаря созданию Пулковской обсерватории Россия заняла ведущее место в мировой астрономической науке. Стала быстро развиваться новая отрасль астрономии — астрофизика. Пулковские определения положений основных, фундаментальных звезд по своей точности в XIX в. превосходили все существующие в то время. Гарвардский астроном, американец Кливлэнд Аббе охарактеризовал Пулково «научным раем», а Вениамин Гулд, основавший в 1849 г. американский «Астрономический журнал», назвал Пулковскую обсерваторию «астрономической столицей мира» [5]. В честь основания Пулковской обсерватории в 1839 г. была выпущена медаль с барельефом Николая I на одной стороне и видом главного здания обсерватории — на другой. Во время правления Александра II (1855—1881) за большой вклад в развитие отечественной астрономии имя Николая I было присвоено Пулковской обсерватории и она стала называться Николаевской.

Академик Ф. А. Бредихин в речи, посвященной 100-летию со дня рождения основателя Пулковской обсерватории, 29 декабря 1896 г. так объяснил заботливое участие Николая I к астрономии: «Император Николай Павлович не был посвящен в глубины астрономической науки, но в его отношении к знанию вообще чувствуется как бы некоторое предпочтение астрономии, какое-то внутреннее расположение к ней. Стройный порядок системы, строгое соподчинение целому, твердость и доказательность перехода от известного к неизвестному ... все это находило сочувственные фибры в возвышенной душе монар-

ха, который в громадной империи своей стремился упрочить законность, стройный порядок и спокойное развитие на стезе правды и добра» [5].

Малоизвестен тот факт, что купол обсерватории хотел расписать прославленный художник, великий Карл Брюллов — брат архитектора Александра Павловича Брюллова, по проекту которого была построена Пулковская обсерватория. Художник представлял купол как небесный свод, на котором он хотел изобразить античных богов, олицетворяющих небесные светила. Работал Брюллов увлеченно. Наброски один за другим появлялись в его альбоме: и старец Юпитер в усыпанном звездами плаще, и Нептун с трезубцем в руках, и стремительно несущейся по небу Феб — все было отмечено вдохновением и экспрессией. Однако замыслам Карла Брюллова не суждено было осуществиться, высочайшего соизволения на роспись купола Пулковской обсерватории не было дано. Остались только наброски к росписи купола. Причиной этому стали неприязненные отношения художника с императором. Как отмечает А. В. Корнилова, К. Брюллов всячески избегал писать портреты царя и членов его семьи [6]. Независимый характер Брюллова помог ему избежать участи придворного живописца, но и стал причиной недовольства самодержца.

Император Николай I обладал удивительной способностью разбираться в людях. Именно он выбрал известного ученого Вильгельма Яковлевича Струве в качестве директора Пулковской обсерватории. В историю мировой науки Вильгельм (имя Василий он принял при переходе в российское подданство) Яковлевич Струве вошел как выдающийся астроном и геодезист. Гений российской науки, один из основателей и первый директор Пулковской обсерватории, отличался гибким умом, инициативностью, целеустремленностью, исключительной работоспособностью. Сфера деятельности Струве была многогранной — звездная астрономия, астрометрия, геодезия, руководство Дерптской и Пулковской обсерваториями. Струве включили в Комиссию по постройке новой академической обсерватории вблизи Петербурга. Вместе с другими учеными он принял активное участие в проектировании Пулковской обсерватории, закупал и заказывал у лучших европейских механиков оборудование, следил за установкой инструментов, разрабатывал план работы обсерватории.

С 1 января 1839 г. новая российская обсерватория приступила к регулярным наблюдениям. С момента открытия Пулковской обсерватории и до 1862 г. Струве являлся ее директором. В связи с этим он в 1839 г. вместе со своей большой семьей переехал из Дерпта в

Санкт-Петербург и принял российское подданство. Одновременно он получил звание наследственного дворянина и был избран в Российскую академию наук. Под его руководством Пулковская обсерватория очень скоро стала центром мировой астрономии того времени. Благодаря В. Я. Струве в России сформировалась своя собственная астрономическая школа.

В течение первых 50 лет ее существования деятельность обсерватории проходила по двум основным направлениям — развитие астрометрии и практической астрономии, и лишь в конце 80-х гг. в планы научной работы была включена астрофизика. Ведущее место в Пулковской обсерватории занимали работы по фундаментальной астрометрии, связанные с наблюдениями всех звезд северного неба до 7-й звездной величины и их обработкой. Результатом колоссального труда наблюдателей стало составление наилучших по тщательности выполнения и точности каталогов прямых восхождений и склонений больших рядов звезд. Прямые восхождения определялись с помощью большого пассажного инструмента, а склонение — большим вертикальным кругом, которые были созданы по идее Струве в Германии талантливым механиком, прославленным строителем многих астрономических инструментов Т. Л. Эртелем. Пулковские каталоги абсолютных прямых восхождений и склонений звезд эпох 1845, 1865, 1885, 1905 гг. и до настоящего времени лежат в основе современных фундаментальных систем звездных положений.

Астрономия всегда имела исключительно важное значение для подготовки военных моряков. Умению ориентироваться в море по звездам учили офицеров на занятиях в Пулковской обсерватории. Поэтому не случайно с Пулковской обсерваторией и астрономией была связана жизнь второго сына Николая I — великого князя Константина Николаевича (1827—1892), генерал-адмирала, реформатора Российского флота. По воле отца мальчик с раннего детства был предназначен для военной службы на флоте. Константину не исполнилось и четырех лет, когда император пожаловал ему звание генерал-адмирала и назначил шефом Гвардейского экипажа. В возрасте 8 лет князь командовал военным судном «Геркулес», в 17 лет — бригам «Улисс» в Финском заливе. В пять лет в 1832 г. Николай I назначил Константину воспитателем известного мореплавателя и полярного исследователя капитана 1 ранга Федора Петровича Литке (1797—1882).

В сентябре 1845 г. Ф. П. Литке был избран вице-президентом вновь созданного Русского географического общества. Президентом

общества стал его юный воспитанник восемнадцатилетний великий князь Константин Николаевич. В 1846 г. Литке стал председателем Морского ученого комитета. По его инициативе был создан в 1848 г. специальный журнал «Морской сборник», на страницах которого офицеры могли обсуждать волнующие их вопросы. При участии Ф. П. Литке была создана магнито-метеорологическая обсерватория, значительно расширили свою деятельность Главная физическая и Пулковская астрономическая обсерватория [7].

Благодаря прекрасным учителям и воспитателям, великий князь Константин Николаевич был всесторонне образованным человеком. Он понимал большую роль использования астрономии для нужд военно-морского флота. В зрелом возрасте князь собрал замечательную библиотеку, составленную из трудов по мореплаванию и современной художественной литературы. Он рассматривал издававшийся при его содействии журнал «Морской сборник» как сильное средство для завершения образования морского офицера. В журнале активно сотрудничали не только такие известные адмиралы как Ф. П. Врангель, К. П. Посыет, но и такие крупные ученые как В. И. Даль, Н. И. Пирогов, В. Я. Струве.

В 1855 г. Константин Николаевич писал адмиралу Ф. П. Врангелю: «Необходимо заблаговременно готовить статьи, дабы всегда быть уверенным в избытке материалов... Весьма полезно украсить «Сборник» извлечением из ... превосходного описания Пулковской обсерватории. Описание сие стоит дорого и, конечно, немногие из наших офицеров имеют оное. ... Сверх того я просил бы вас предложить В. Я. Струве ... написать мысли его о тех услугах, которые ... мореплаватели оказали астрономии ...» [7].

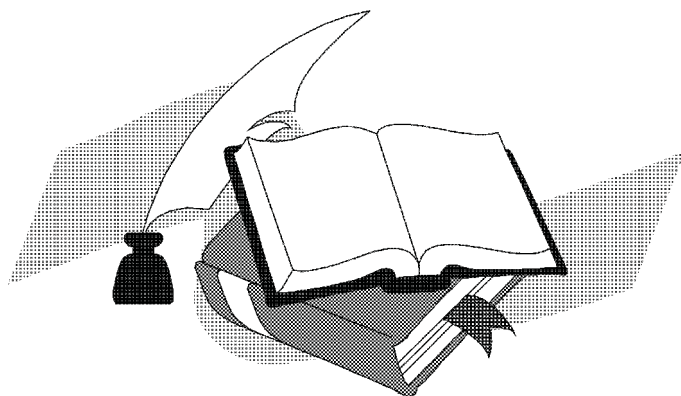
По политическим убеждениям Константин Николаевич гораздо больше, чем его старший брат, император Александр II, склонялся к проведению либеральных реформ в России и меньше опасался проблем, вызванных такими переменами. Он был горячим сторонником отмены крепостного права. После проведения этой важнейшей для страны реформы, свободу получили 22 млн крепостных. Константин Николаевич за свой большой вклад в проведение крестьянской реформы был награжден золотой медалью императором Александром II. В своем дневнике он писал: «21 апреля 1861. Вечером Саша мне прислал медаль золотую по крестьянскому делу, написавши на конверте: “Вот тебе медаль, с повторением еще раз искреннего моего спасибо”» [8].

Таким образом, роль Николая I и Константина Николаевича в развитии отечественной науки была очень значительной. Николай I осознавал, как и его предшественник Петр Великий, прямую зависимость между развитием точных наук, просвещением подданных и благосостоянием государства. Поэтому он и старался поддержать, одобрить всякого рода важнейшие начинания, к числу которых относится и создание Пулковской астрономической обсерватории.

Список литературы

1. *Боханов А. Н.* Николай I. — М.: Вече, 2008.
2. *Левитская Т. И., Начапкин М. Н.* Роль российских монархов в становлении отечественной астрономической науки // Физика Космоса: Тр. 31-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2002 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. — С. 212.
3. *Балязин В.* Самодержцы. В 2 кн. Кн. 2. — М.: ОЛМА-ПРЕСС, 1999.
4. *Абалакин В. К.* Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Академии наук СССР — полтора века: к истории основания. 150 лет Пулковской обсерватории. — Л.: Наука, 1989.
5. Николай Первый и его время. Т. 1. — М., 2000.
6. *Корнилова А. В.* Карл Брюллов в Петербурге. — Л., 1976.
7. *Коршунов Ю. Л.* Генерал-адмиралы Российского императорского флота. — СПб., 2003.
8. 1857-1861; Переписка Императора Александра II с Великим Князем Константином Николаевичем. Дневник Великого Князя Константина Николаевича / Сост. Л. Г. Захарова, Л. И. Тютюнник. — М.: Терра, 1994.

Литературные страницы



Два блага

*Прогнозы, которые не оправдались,
следует считать пророчествами...*

Догма предсказателей

Два БЛАГА боги даровали нам
(Законом утвердив их непреложность):
СПОСОБНОСТЬ ЗАБЫВАТЬ и НЕВОЗМОЖНОСТЬ
Узнать, прозреть, что — впереди, что — *там?!*

От памяти легко освободиться,
Забывши всё, что было на Земле,
Но как поверить, как душой смириться,
Что будущее в той же скрыто мгле?!

Да, прошлое, что нами позабыто,
Летя вдогонку, беспощадно мстит...
Но ведь и Зло, что в будущем сокрыто,
Совсем не в рай дорожку нам мостит!

Оно для нас не меньшая угроза,
И нам ее ничем не отвести,
Не скажут ни поэзия, ни проза,
Куда нам плыть, куда теперь грести?

Плывем во тьму, до первого утёса, —
Ни компаса, ни карты, ни звезды,
Не видя дальше собственного носа,
Как нам не ждать погибельной беды?..

Два блага боги даровали людям:
Дорог своих не помнить и знать...
Неужто мы и впредь все также будем
О прошлом – врать, о будущем — гадать?!

4 ноября 2009

Мадонна

Ты проходишь по краю сознания,
Как Мадонна по краю облака,
И – бессильно мое всезнание! —
Не раскрыто твое инкогнито!

Синевою, встающей с Востока,
Наполняется круг мироздания. . .
Все ясней предначертанность срока
В незазначенной дате свидания!

. . . Осыпаются стылые листья,
Молкнут птицы в замерзшем саду,
С поседолой рябиновой кистью
Я к тебе на свиданье иду. . .

2 октября 2009

На языке любви

О как же мы с тобой
В былые наши дни
Друг друга с полуслова
Понимали...
Тогда мы речь вели
На языке Любви,
Сейчас мы говорим
На языке Печали!

О как же мы легко
В те молодые дни
Добро и Зло по жизни
Различали...
Единым был весь мир
В Неведенье Любви,
Сейчас он разделен
Всеведением Печали!

О как же мы тогда
Ни тяжести Земли,
Ни замкнутости сфер
Не замечали,
Мы верили в закон
Всесилия Любви,
Еще не ощутив
Бессилия Печали!

... Наивность юных лет,
Как ниточку — продли,
Пусть молодость
Вернется к нам едва ли! —
Слагаются стихи
На языке Любви,
Хотя звучат порой
На языке Печали...

*13 декабря 2009 в поезде «Две столицы»,
с 2 до 4 часов утра*

Список участников

ФИО	Организация	e-mail
Аввакумова Е. А.	УрГУ	Ekaterina.Avvakumova@usu.ru
Ахматханова Г. Г.	УрГУ	mlodik_87@mail.ru
Баева К. В.	УрГУ	Heat_Ray@e1.ru
Балануца П. В.	—	saimsu@mail.ru
Бахтияров М. А.	УрГУ	bma-gbf@ya.ru
Безбородов М. А.	ВолГУ	mabezborodov@rambler.ru
Белинский А. А.	ГАИШ	aleks@sai.msu.ru
Белых М. А.	УрГУ	mizza007@mail.ru
Беркутов В. С.	СПбГУ	dairtarg@gmail.com
Бисярина А. П.	УрГУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Бобин С. Б.	УрГУ	merfolk92@mail.ru
Борисова Е. В.	СПбГУ	lenabori@gmail.com
Буднев Н. М.	ИГУ	nbudnev@api.isu.ru
Бутенко М. А.	ВолГУ	butenkoma@gmail.com
Васюнин А. И.	МПИА	vasyunin@mpia.de
Верходанов О. В.	САО РАН	vo@sao.ru
Веселков С. А.	СибГАУ	veselkovsa@sibsau.ru
Вибе Д. З.	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Ю. З.	УрГУ	wjulia@mail.ru
Габдеев М. М.	КГУ	crucifer.troll@gmail.com
Гламазда Д. В.	УрГУ	Dmitriy.Glamazda@usu.ru
Гомолко А. Н.	УрГУ	Antuano@mail.ru
Горбовской Е. С.	ГАИШ	gorbovskoy@sai.msu.ru
Горда С. Ю.	АО УрГУ	Stanislav.Gorda@usu.ru
Добровлянская О. А.	УрГУ	olga.dobrovlyanskaya@gmail.com
Доманская К. С.	ВолГУ	christinadomanskaya@gmail.com
Дормидонтов Д. В.	КГАОС	solar@megalog.ru
Дорогов А. А.	УрГУ	dorogov.alexey@gmail.com
Дремов В. В.	РФЯЦ	vvvd0531@mail.ru
Дремова Г. Н.	РФЯЦ	G.N.Dryomova@mail.ru
Есипов В. Ф.	ГАИШ	esipov@sai.msu.ru
Железнов Н. Б.	ИПА РАН	nickzhel@mail.ru
Заложных И. С.	АО УрГУ	3730630@mail.ru
Замоздра С. Н.	ЧелГУ	sezam@csu.ru
Захарова П. Е.	УрГУ	Polina.Zakharova@usu.ru
Зимнухов Д. С.	ГАИШ	zimnuhov@gmail.com
Зинченко И. И.	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru

ФИО	Организация	e-mail
Зубкова А. В.	ИГУ	nastya_zzz@mail.ru
Иванов К. И.	АО ИГУ	ivorypalace@gmail.com
Игошев А. П.	СПбГУ	igoshev-andrei@rambler.ru
Ильина М. А.	ГАИШ	taktonado@gmail.com
Искалина М. С.	УрГУ	iskalina@inbox.ru
Ишмухаметова М. Г.	КГУ	mig-ksu@mail.ru
Казанцев А. Н.	СибГАУ	petrochenkoab@sibsau.ru
Казанцев М. Б.	ЧелГУ	kazant@csu.ru
Казин В. В.	УрГУ	vkazin@rambler.ru
Кайзер Г. Т.	УрГУ	Galina.Kajzer@usu.ru
Калинин А. А.	АО УрГУ	Aleksandr.Kalinin@usu.ru
Калинина Н. Д.	АО УрГУ	Nataliya.Kalinina@usu.ru
Кауц В. Л.	АКЦ ФИАН	kauts@asc.rssi.ru
Кирсанова М. С.	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Клепнев А. С.	ИКИ	klepnev.alexander@gmail.com
Коваль В. В.	ЮФУ	koval@ip.rsu.ru
Кожевников В. П.	УрГУ	valerij.kozhevnikov@usu.ru
Кожевникова А. В.	АО УрГУ	Alla.Kozhevnikova@usu.ru
Колбин А. И.	КГУ	kolbinalexander@mail.ru
Кондратьева Е. Д.	КГУ	mig-ksu@mail.ru
Кононов Д. А.	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Константинов Е.	ИГУ	karburator.89@mail.ru
Копытова Т. Г.	УрГУ	duisiya@gmail.com
Корнилов М. В.	ГАИШ	aleks@sai.msu.ru
Корнилов В. Г.	ГАИШ	victor.kornilov@googlemail.com
Кортунов П. В.	ГАИШ	aleks@sai.msu.ru
Костин И. В.	СибГАУ	kostiniv@sibsau.ru
Крушинский В. В.	УрГУ	krussh@gmail.com
Кувшинов Д. А.	ГАИШ	vilfred1@gmail.com
Кудинова С. И.	ЮФУ	kudinovasvetlana@mail.ru
Кузнецов Э. Д.	УрГУ	Eduard.Kuznetsov@usu.ru
Кузнецов А.	ГАИШ	aleks@sai.msu.ru
Кукса М. М.	ИАТЭ	kuksamax@yandex.ru
Кумсиашвили М. И.	Абастуманская АО	kumsiashvili@genao.org
Ладейщиков Д. А.	УрГУ	helioz@mail.ru
Лапинов А. В.	ИПФ РАН	lapinov@appl.sci-nnov.ru
Лебедев Н. Г.	ВолГУ	nikolay.lebedev@volsu.ru
Левитская Т. И.	УрГУ	Tatyana.Levitskaya@usu.ru
Ленок В. В.	ИГУ	lenok240290@inbox.ru
Липунов В. М.	ГАИШ	lipunov2007@gmail.com

ФИО	Организация	e-mail
Лихачев В. Н.	ЗАО «Дубль-Гео»	geozad@yandex.ru
Любимов В. Н.	ВолГУ	llook@ya.ru
Лямова Г. В.	АО УрГУ	GVLYAMOVA@yandex.ru
Макаренко Н. Г.	ГАО РАН	ng-makar@mail.ru
Мартынова А. И.	СПбГЛТА	vor@astro.spbu.ru
Марчук А. А.	СПбГУ	aamarchuk@gmail.com
Марчук А. А.	СПбГУ	aamarchuk@gmail.ru
Машонкина Л. И.	ИНАСАН	lima@inasan.ru
Миронов А. В.	ГАИШ	almir@sai.msu.ru
Мюлляри А. А.	ТУ	alemio@utu.fi
Найден Я. В.	СПбГУ	yarnaid@gmail.com
Никифорова Т. П.	АО УрГУ	Tatyana.nikiforova@usu.ru
Новикова А. П.	ГАИШ	sasha.novikova@gmail.com
Орлов В. В.	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Островский А. Б.	УрГУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Павловский К. С.	СПбГУ	admin@surferus.com
Павлюченков Я. Н.	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Парфёнов С. Ю.	УрГУ	grey1105@yandex.ru
Пархоменко А. В.	КГАОС	gas-ran@mail.ru
Перминов А. С.	УрГУ	perminov12@yandex.ru
Петрова О. Н.	ИГУ	redponick@gmail.com
Печникова Л. А.	УрГУ	lidija-teufel@rambler.ru
Полушина Т. С.	УрГУ	Tatyana.Polushina@usu.ru
Попова М. Э.	УрГУ	Maria,Popova@usu.ru
Прохоров М. Е.	ГАИШ	mike.prokhorov@gmail.com
Пунанов Г. Ф.	УрГУ	gpunanov@mail.ru
Раздымакина О. Н.	ТГУ	Oksanchik@mail2000.ru
Рамазанова Г. Р.	УрГУ	gyzialsneg@gmail.com
Ромашин Г. С.	УрГУ	Georgij.Romashin@usu.ru
Рохас М. М.	СПбГУ	madelainerojas@mail.ru
Рубинов А. В.	НИАИ СПбГУ	rav@astro.spbu.ru
Рябова М. В.	ЮФУ	rgyaf@yandex.ru
Салий С. В.	АО УрГУ	Svetlana.Salii@usu.ru
Сафутдинов Е. Р.	МГУ	YegorSaf@mail.ru
Селезнев А. Ф.	АО УрГУ	Anton.Seleznev@usu.ru
Сильченко О. К.	ГАИШ	olga@sai.msu.ru
Склянов А. С.	КТУ	ssklyanov@yandex.ru
Скрипниченко П. В.	УрГУ	savl-silverheart@rambler.ru
Смирнов Г. Т.	ПРАО АКЦ ФИ РАН	smirnov@prao.ru
Смирнова К. И.	УрГУ	Arashu@rambler.ru

ФИО	Организация	e-mail
Снеткова Ю. А.	«ЦСКБ-Прогресс»	JSnet@mail.ru
Соболев А. А.	УрГУ	fortrest@uralweb.ru
Соболев А. М.	АО УрГУ	Andrej.Sobolev@usu.ru
Соловьёв Д. И.	СПбГУ	drukhi@ya.ru
Соловьёв А. А.	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Старикова С. В.	ИГУ	fumytox@mail.ru
Судов Л. Н.	СПбГУ	l_sudov@mail.ru
Сухарева Е. А.	ЧелГУ	suharevaea@mail.ru
Талалаев И. В.	ИНАСАН	ctpelok@list.ru
Теханович Д. И.	СПбГУ	foobat@yandex.ru
Тлатов А. Г.	КГАОС	solar@narzan.com
Толумбаева Д. А.	СПбГУ	g_e_r_d_a@mail.ru
Тутуков А. В.	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Тюрина Н. В.	ГАИШ	tiurina@sai.msu.ru
Усанин В. С.	КГУ	VUsanin@yandex.ru
Устюгов В. А.	ЧелГУ	vasily.ustygov@edu.csu.ru
Фадеева В. А.	УрГУ	blimm.92@mail.ru
Фатеева А. М.	ИНАСАН	fateeva@inasan.ru
Фирсов К. М.	ВолГУ	fkm@iao.ru
Хайбрахманов С. А.	ЧелГУ	sergej.khajbrakhmanov@edu.csu.ru
Холшевников К. В.	АИ СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хоперсков С. А.	ВолГУ	shoperskov@gmail.com
Хоперсков А. В.	ВолГУ	akhoperskov@rambler.ru
Хусанова Я. И.	УрГУ	elephunka-bep@inbox.ru
Цивилев А. П.	ПРАО АКЦ ФИ РАН	tsivilev@prao.ru
Чазов В. В.	ГАИШ	zov@sai.msu.ru
Чурюмов К. И.	КНУШ	klivch@mail.ru
Шагабутдинов А. И.	УрГУ	Shgb-alik@yandex.ru
Шагабутдинов А. А.	УрГУ	Shgb-alik@yandex.ru
Шагдурова В. О.	ТГУ	vika89@mail2000.ru
Шайдулин В. Ш.	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шатский Н. И.	ГАИШ МГУ	lipunov2007@gmail.com
Шиманский В. В.	КГУ	Slava.Shimansky@ksu.ru
Шпекин М. И.	КГУ	msh@ksu.ru
Шустов Б. М.	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Эскин Б. Б.	СПбГУ	esk@astro.spbu.ru
Юрков В. В.	ВГПУ	stella@ascnet.ru
Юшкин М. В.	САО	maks@sao.ru
Юшков И. А.	УрГУ	Wave_hos@mail.ru
Язев С. А.	ИГУ	uustar@star.isu.ru

ФИО	Организация	e-mail
Bieging J.	Steward Observatory	jbieging@as.arizona.edu
Boley P.	MPIA	pboley@gmail.com
Carraro G.	ESO	gcarraro@eso.org
Kinemuchi K.	UF, USA	kinemuchi@astro.ufl.edu
Sarajedini A.	UF, USA	ata@astro.ufl.edu
Xu Y.	PMO	xuye@pmo.ac.cn
Yang J.	PMO	jijiang@pmo.ac.cn

Содержание

Программа конференции	5
Обзорные лекции	18
Васюнин А. И. Химия протопланетных дисков	18
Вибе Д. З. Массивные звезды	19
Замоздра С. Н. О практической пользе теории звездообразования	38
Зинченко И. И. Актуальные задачи и новые инструменты мил- лиметровой и субмиллиметровой астрономии	46
Ишмухаметова М. Г., Андреев В. В. Комплекс метеорных тел как инструмент для изучения эволюции и динамики ма- лых тел Солнечной системы	61
Кауц В. Л. Темная материя во Вселенной и Солнечной системе	71
Лапинов А. В. Использование прецизионной спектроскопии для исследований областей звездообразования и фундаменталь- ных свойств Вселенной	80
Макаренко Н. Г. Геометрия и топология астрономических изоб- ражений	81
Машонкина Л. И. Звезды с дефицитом металлов о нуклеосин- тезе в Галактике	83
Миронов А. В., Захаров А. И., Прохоров М. Е. Многоцвет- ные фотометрические системы: прошлое и настоящее	85
Орлов В. В., Рубинов А. В., Мартынова А. И. Периодиче- ские орбиты в задаче N тел	108
Прохоров М. Е., Захаров А. И., Миронов А. В. Фотомет- рические программы для Новых Коуровских Телескопов — взгляд со стороны	123
Сильченко О. К. Медленная динамическая эволюция галактик	134
Соловьев А. А. Магнитогидростатические конфигурации в кос- мической плазме: структура магнитной звезды, шаровая магнитная бомба и др.	149
Холщевников К. В., Мюлляри А. А. Определение орбит вне- солнечных планет методом лучевых скоростей	151
Чурюмов К. И. Новое о природе комет после космических мис- сий Айс, Вега, Джотто, Дип Спейс, Стардаст, Дип Импект и перед миссией Розетта	164
Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: работа для аст- рономов!	181
Тезисы студенческих докладов	196
Безбородов М. А. Распределение межзвездной пыли за фрон- том галактической ударной волны: численная модель	196

Беркутов В. С., Найдено Я. В., Верхованов О. В. Симметрия анизотропии космического микроволнового фона	197
Бисярина А. П., Перминов А. С. Резонансная структура области движения искусственных спутников Земли	198
Борисова Е. В. Хроматическая переменность блазаров	199
Габдеев М. М. Кривая блеска оптического транзита GRB060526	200
Доманская К. С. Динамика столкновений облаков HI в МЗС	201
Игошев А. П. Эволюция магнитных потоков звезд	202
Клепнев А. С. Аккреционные диски вокруг черных дыр	203
Колбин А. И. Определение фундаментальных параметров звезд спектральных классов А, F методом инфракрасных потоков	204
Копытова Т. Г., Крушинский В. В., Горбовской Е. С., Липунов В. М., Белинский А. А., Корнилов В. Г., Тюрина Н. В., Кувшинов Д. А., Балануца П. В., Тлатов А. Г., Язев С. А., Юрков В. В. и др. Измерение поляризации GRB091020 и GRB091127 по наблюдениям телескопа «МАСТЕР-II», Кисловодск	205
Любимов В. Н. Трехмерное моделирование столкновений облаков HI в межзвездной среде	206
Марчук А. А. Кривые вращения галактик и адиабатическое поджатие темного гало	207
Павловский К. С. Моделирование полей скоростей пекулярных галактик	208
Парфёнов С. Ю., Соболев А. М., Кирсанова М. С. Об определении электронной температуры в зонах НII по оптическим линиям ионов кислорода	209
Сафутдинов Е. Р. Зондирование межзвездной плазмы сигналами радиопульсаров	210
Склянов А. С. Фотометрические исследования карликовой новой MN Dga в июле—сентябре 2009 г.	211
Соловьёв Д. И., Верхованов О. В. Статистика внегалактических объектов в области Холодного Пятна на картах CMB WMAP	212
Сухарева Е. А. Исследование фрагментации коллапсирующих турбулентных протозвездных облаков	213
Теханович Д. И. Неоднородности в распределении галактик согласно обзору SDSS DR7	214
Толумбаева Д. А. Исследование зацепленности орбит астероидов	215
Устюгов В. А. Генерация магнитного поля в аккреционном диске системы Cyg X1	216
Хайбрахманов С. А. Магнитогазодинамическая модель аккреционных дисков молодых звезд	217

Хоперсков С. А. Расчет глобальных собственных мод в газовом галактическом диске в линейном и нелинейном приближениях	218
Шагдурова В. О. Кинематическое моделирование орбит внутренних спутников	219
Тезисы кратких сообщений	220
Бутенко М. А. Особенности распределения темного вещества в гало и спиральная структура дисковых галактик	220
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Роль межгалактического газа в динамической эволюции галактического скопления, погруженного в поле темного вещества	221
Железнов Н. Б. AMPLE 3 — многоцелевой программный пакет для исследования малых тел Солнечной системы	222
Ишмухаметова М. Г., Кондратьева Е. Д., Усанин В. С. Теоретические радианты новых периодических комет	223
Коваль В. В. Влияние радиальной миграции звезд на параметры эллипсоидов скоростей в галактическом диске	224
Кононов Д. А. Доплеровское картирование SS Cygni во время вспышки	225
Мартынова А. И. Исследование состояний и движений в общей задаче трех тел	226
Раздымакина О. Н. Области возможных движений АСЗ в окрестности резонанса $1/2$ с Землей	227
Рябова М. В. Проблема происхождения антикорреляции $[O/Na]$ в шаровых скоплениях	228
Соболев А. М., Boley P., Biegging J., Yang J., Xu Y., Цивилев А. П., Смирнов Г. Т. Область звездообразования S 235 C	229
Судов Л. Н. Об одном методе регуляризации уравнений небесной механики	230
Шайдулин В. Ш. Оценка скорости убывания общего члена ряда Лапласа для геопотенциала	231
Эскин Б. Б. Влияние эффекта Лидова—Кодзаи на особенности резонансного движения в экзопланетных системах	232
Стендовые доклады	233
Ахматханова Г. Г., Соболев А. М., Юшкин М. В., Boley P., Biegging J. Туманность S233 и создающая ее звезда	233
Бутенко М. А., Хоперсков А. В. О влиянии вертикальной неоднородности галактического диска на гравитационную устойчивость	234
Горда С. Ю., Соболев А. М. Новая переменная?	235

Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кайзер Г. Т., Кузнецов Э. Д.	
Результаты наблюдений высокоорбитальных спутников Земли на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2009 году	236
Кайзер Г. Т., Вибе Ю. З., Гламазда Д. В., Скрипниченко П. В.	
Позиционные наблюдения малых планет в Коуровской астрономической обсерватории Уральского государственного университета	237
Кожевников В. П.	
Наблюдения промежуточного поляра XSS J00564+4548	238
Кожевникова А. В., Кожевников В. П., Дорогов А. А., Юшков И. А.	
Пятенная активность системы CG Cyg: три новых сезона наблюдений	239
Лямова Г. В.	
Скорость вращения солнечных пятен	240
Никифорова Т. П., Шагабудинов А. И., Калинин А. А., Копытова Т. Г., Парфёнов С. Ю., Искалина М. С.	
Наблюдения протуберанцев в АО УрГУ летом 2009 г.	241
Островский А. Б., Соболев А. М.	
О диагностике пылевой компоненты окружения метанольных мазеров	242
Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З., Фатеева А. М.	
Тепловая структура массивных дозвездных ядер	243
Полушина Т. С., Кумсиашвили М. И.	
Фотометрическое исследование переменности массивной двойной системы с горячими компонентами UU CAS	244
Пунанов Г. Ф., Лихачев В. Н., Бахтияров М. А., Казин В. В.	
Создание планово-высотного обоснования для топографической съемки масштабов 1:500—1:5 000	245
Рохас М. М.	
Бариевые звезды	246
Салий С. В.	
Расширенная база значений населенностей уровней метанола	247
Салий С. В., Соболев А. М.	
Оценка физических параметров S255 N, IR и S по линиям метанола	248
Селезнев А. Ф., Carraro G., Sarajedini A., Kinemuchi K.	
Исследование структуры рассеянного скопления M35	249
Снеткова Ю. А.	
Новые оценки радиуса, массовой плотности и массы ядер некоторых короткопериодических комет	250
Из истории науки	251
Левитская Т. И.	
Создатели и творцы Пулковской обсерватории	252
Литературные страницы	258
Соловьев А. А.	
	259
Список участников	262

Научное издание

Физика Космоса

Труды 39-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург, Россия,
1–5 февраля 2010 г.

Труды конференции не редактировались
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 20.01.10. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 15,4. Усл. печ. л. 15,8
Тираж 160 экз. Заказ .

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.
Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ»
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343)350-56-64.

ISBN 978–5–7996–0497–4

